

**ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA DISPOSITIVO DE RASTREO DE
TRAMPAS DE PETROLEO USANDO SEÑALES ELECTROMAGNETICAS
INDUCIDAS**

CRISTIAN CAMILO LÓPEZ ACHURY

CÓDIGO: 1.088.237.907

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

PEREIRA

2015

**ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA DISPOSITIVO DE RASTREO DE
TRAMPAS DE PETROLEO USANDO SEÑALES ELECTROMAGNETICAS
INDUCIDAS**

CRISTIAN CAMILO LÓPEZ ACHURY

CÓDIGO: 1.088.237.907

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesor: INGENIERO ALEXANDER MOLINA CABRERA

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA

PEREIRA

2015

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, 9 de Abril de 2015

DEDICATORIA

Dedicado primordialmente a Dios y a mi familia; quienes han sido la fuente de inspiración para mi crecimiento personal y profesional, ya que siempre han estado a mi lado apoyándome en todos los proyectos que he emprendido, de igual manera lo dedico a quienes con su ejemplo y apoyo hicieron posible mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por estar a mi lado siempre; por la fortaleza y la sabiduría y la entereza que me ha brindado.

Agradezco a mi esposa y a mi hija, porque con su apoyo incondicional me han ayudado a crecer, a no desistir en los momentos más difíciles de mi vida, porque con su amor y paciencia me han impulsado para continuar en la difícil tarea de convertirme en profesional.

Agradezco a mi prestigiosa universidad por haberme brindado los conocimientos y enseñanza; de igual manera a todo el equipo de docentes, en especial a mi asesor que me han dedicado su tiempo para lograr mi mayor anhelo.

Por último, Agradezco a mis compañeros quienes me han manifestado su apoyo moral e incondicional; para lograr aquello que será una de mis mayores recompensas a nuestro esfuerzo y dedicación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO I. MARCO GENERAL DE LA INVESTIGACION	13
1.1 TEMA.....	13
1.2 TITULO.....	13
1.3 AREA DE INVESTIGACION	13
1.4 MATERIAS DE INVESTIGACION	13
1.5 COBERTURA DEL ESTUDIO.....	13
1.6 CAMPO DE INTERES.....	13
1.7 DIRECTOR	13
1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.9 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.10 OBJETIVOS.....	14
1.10.1 Objetivo General:	14
1.10.2 Objetivos Específicos:.....	15
1.11 JUSTIFICACION	15
CAPITULO II. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1 ANTECEDENTES	17
2.2 FUNDAMENTOS TEORICOS.....	20
2.2.1 El Suelo.....	20
2.2.1.1 Definición.....	20
2.2.1.2 Capas del Suelo y características	20
2.2.1.3 Tipos de suelo	22
2.2.2 Hidrocarburos	24
2.2.2.1 Definición.....	24

2.2.3 El Petróleo	25
2.2.3.1 Definición.....	25
2.2.3.2 Composición	26
2.2.3.3 Formación.....	27
2.2.3.3.1 Cuencas Sedimentarias	28
2.2.3.4 Etapas y Métodos de la Exploración del Petróleo	36
2.2.3.4.1 Identificación del Área De Interés y Método Geológico	38
2.2.3.4.2 Detección de Trampas y Método Geofísico.....	39
2.2.3.4.3 Verificación de la acumulación y Método Geoquímico	44
2.2.4 Trampas de Petróleo	46
2.2.4.1 Definición de Trampas de Petróleo	46
2.2.4.2 Tipos de Trampa de Petróleo	49
2.2.4.2.1 Trampas Estructurales	49
2.2.4.2.2 Trampas Estratigráficas.....	52
2.2.4.3 Elementos de las Trampas de Petróleo	60
2.2.4.4 Condiciones para la Existencia de una trampa	61
2.2.5 Efectos de la Explotación del Petróleo Sobre el Medio Ambiente.....	62
2.2.5.1 Impactos en el Medio Ambiente	62
2.3 COMPONENTES FISICOS Y ELECTROMAGNETICOS DE LAS CAPAS TERRESTRES	62
2.3.1 Capas de la Tierra	62
2.3.1.1 La Corteza	63
2.3.1.1.1 Corteza Continental	63
2.3.1.1.2 Cratones	64
2.3.1.1.3 Orógenos	65

2.3.2 Composición de la Corteza	66
2.3.2.1 El Manto	67
2.3.2.2 El Núcleo	69
2.3.3 Métodos Directos para el Estudio del Interior de la Tierra	70
2.3.4 Métodos Indirectos para el Estudio del Interior de la Tierra	71
2.3.4.1 Métodos Sísmicos	71
2.3.4.2 Métodos Gravimétricos	71
2.3.4.3 Métodos Magnéticos	73
2.3.4.4 Métodos Eléctricos	74
2.3.4.5 Métodos Térmicos	75
2.3.4.6 Métodos Astronómicos	75
2.3.5 Propiedades Físicas y Electromagnéticas de las Capas de la tierra	76
2.3.5.1 Peso Específico	76
2.3.5.2 Permeabilidad	76
2.3.5.3 Permeabilidad Magnética	76
2.3.5.4 Permitividad Dieléctrica	77
2.3.5.5 Coeficiente de Resistividad	77
2.3.5.6 Conductividad Térmica	78
2.4 MARCO CONTEXTUAL	79
2.4.1 Cuencas Sedimentarias de Petróleo en Colombia	79
2.4.1.1 Cuenca Caguan Putumayo	79
2.4.1.2 Cuenca Valle Superior del Magdalena	80
2.4.1.3 Cuenca Valle Medio del Magdalena	81
2.4.1.4 Cuenca Valle Inferior Del Magdalena	82

2.4.1.5 Cuenca De Los Llanos Orientales	82
2.4.1.6 Cuenca Catatumbo	83
2.4.1.7 Cuenca Guajira	84
2.4.1.8 Cuencas No Productoras en Colombia	85
2.5 MARCO LEGAL	86
2.5.1 Normatividad	86
2.5.1.1 Bases Legales Generales	86
2.5.1.2 Bases Legales Específicas.....	88
CAPITULO III. METODOLOGIA	90
3.1 TIPO DE INVESTIGACION	90
3.2 METODO DE INVESTIGACION	90
3.3 POBLACION Y MUESTRA	91
3.4 FUENTES PARA LA RECOLECCION DE DATOS	91
3.5 TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS	91
3.5.1 Análisis Documental	91
CAPITULO IV. PROPUESTA	92
4.1 DESCRIPCION ELECTROMAGNETICA DEL SUELO PARA EL HALLAZGO DE TRAMPAS DE PETROLEO	92
4.1.1 Horizonte A	93
4.1.2 Horizonte B.....	94
4.1.3 Horizonte C.....	96
4.2 DESCRIPCION DE UN MODELO IDEAL DE UNA TRAMPA DE PETROLEO	98
4.3 PROPUESTA DEL APARATO DETECTOR DE TRAMPAS DE PETROLEO	103
4.3.1 Descripción del Aparato y configuración	104
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111

5.1 CONCLUSIONES	111
5.2 RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFIA.....	113
Linkografía:	118

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran preocupación a nivel mundial en todo lo relacionado a los temas ambientales; por su parte la Constitución Nacional de 1991 en su Artículo 97 expresa “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantiza la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarla. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”; por tal razón teniendo presente los temas ambientales se ha buscado que las industrias en especial las de petróleo implementen nuevas tecnologías que coadyuven a la preservación del medio ambiente.

Es indudable que el petróleo constituye hoy en día el motor de nuestra economía colombiana, ya que es el principal generador de divisas para Colombia, la cuarta economía de América Latina, por exportaciones, impuestos y regalías y representa cerca de un 20 por ciento de sus ingresos generales¹.

En ese orden, el petróleo genera una renta superior a la que ofrece la producción del café, el cual se ha constituido en nuestro producto tradicional de exportación, considerado como la fuente principal de rentas para los diferentes departamentos de nuestro territorio colombiano, ya por las regalías; resultado de su explotación o por las diferentes contribuciones fiscales en las distintas fases del proceso de su explotación.

Si bien es cierto; la explotación petrolera en nuestro País acarrea muchos beneficios económicos, como lo son la generación de empleo; el fortalecimiento del fisco nacional, departamental y municipal y la generación de divisas al país, no

¹ <http://www.portafolio.co/economia/el-impacto-la-caida-la-renta-petrolera-sera-2016>

podemos ser ajenos a tener claridad de que también tiene un gran impacto en el medio ambiente, ya que esta explotación genera impacto en cada una de sus diferentes etapas como lo son: La exploración, la perforación, producción, transporte y refinación. Así por ejemplo los explosivos usados durante la exploración sísmica, envían los recursos hídricos a mayor profundidad, ocasionando la desaparición de nacederos. Por otra parte durante estas etapas se generan desechos, se da la contaminación por gases, sobre los suelos, la deforestación y se construyen trochas de penetración a lugares de reserva natural es decir a aquellos que son importantes para la conservación del ecosistema.

En ese sentido uno de los recursos más vulnerados con la explotación de petróleo es el agua si tenemos en cuenta por ejemplo que en un pozo el porcentaje de petróleo es más alto que el de agua, desde que empieza a producirse petróleo en dichas zonas el agua va secándose; sumado a esto algunos expertos afirman que el agua encontrada en dichos pozos no es apta para ser consumida por los seres humanos debido a la elevada carga mineral y de algunos otros factores.

En este orden de ideas con esta investigación se pretende brindar algunos elementos conceptuales para la elaboración de un dispositivo de rastreo de trampas de petróleo usando señales electromagnéticas inducidas, con el cual se pretende mejorar las condiciones tecnológicas para efectuar el proceso de exploración de hidrocarburos buscando con esto disminuir el impacto ambiental.

CAPITULO I. MARCO GENERAL DE LA INVESTIGACION

1.1 TEMA

Teoría Electromagnética

1.2 TITULO

Elementos conceptuales para dispositivo de rastreo de trampas de petróleo usando señales electromagnéticas inducidas.

1.3 AREA DE INVESTIGACION

Ingeniería en investigación y análisis de campos magnéticos y eléctricos.

1.4 MATERIAS DE INVESTIGACION

- Métodos y técnicas para la exploración de hidrocarburos en el interior del suelo.
- Modelamiento de fenómenos físicos.
- Teoría electromagnética.
- Exploración no invasiva y no destructiva.

1.5 COBERTURA DEL ESTUDIO

De carácter investigativo y aplicativo.

1.6 CAMPO DE INTERES

Métodos y técnicas para la exploración del interior del suelo en búsqueda de trampas de petróleo.

1.7 DIRECTOR

Alexander Molina Cabrera – Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira.

1.8 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad las compañías petrolíferas se encuentran invirtiendo gran cantidad de sus recursos a la investigación de métodos y técnicas que mejoren la exploración y el hallazgo de reservas de petróleo.² Los métodos actuales son muy costosos, poco eficientes y la gran mayoría muy destructivos para el medio ambiente.³

Se desea encontrar e implementar un método basado en el uso de señales electromagnéticas que solucione todas esas falencias y arroje resultados confiables en poco tiempo para la exploración de las capas internas del suelo.

1.9 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible construir un dispositivo para la exploración de hidrocarburos usando señales electromagnéticas; como la herramienta que requieren las empresas petroleras para mejorar la eficiencia en cuanto a la exploración y el hallazgo de reservas de petróleo; disminuyendo así el impacto ambiental y la relación costo-beneficio?

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 Objetivo General:

Proponer elementos conceptuales, para la creación de un mecanismo utilizado para rastrear y detectar trampas de petróleo por medio del uso de campos

² James Brady, Tracy Campbell, Chuck Campbell, Leendert Combee, Tiziano Labruzzo, "Sondeos Electromagnéticos para la exploración de petróleo y gas". Oilfield Review Spring 2009:21, N°1. Schlumberger, pg. 4

³ M. Makhous, Y. Galushkin, B. Biju, M. Le Ravalec, A. Rojey. "Oil and Gas Exploration and Production: Reserves, Costs, Contracts. ". Centre Economie et Gestion de L'Ecole du Petrole et des Moteurs, Edition 2002, Paris. Pg. 65.

electromagnéticos inducidos, especificando sus características y condiciones de manejo del dispositivo propuesto.

1.10.2 Objetivos Específicos:

- Explicar los principales componentes y procesos para la exploración de hidrocarburos.
- Describir de forma general las características de las trampas de hidrocarburos.
- Describir los componentes físicos y electromagnéticos (peso específico, permeabilidad, permitividad, coeficiente de resistividad, coeficiente de conductividad, etc.) de las diferentes capas terrestres.
- Proponer un modelo ideal para el estudio y análisis de yacimientos, de forma que se pueda interpretar las trampas de petróleo.
- Comentar los diferentes métodos usados en la actualidad para el rastreo y exploración de trampas de petróleo.
- Definir las características del dispositivo propuesto.

1.11 JUSTIFICACION

Las compañías petroleras se encuentran en búsqueda constante de métodos eficientes para la exploración del subsuelo que les permitan hallar posibles trampas de petróleo, ya que los métodos que se usan en la actualidad son muy costosos, poco eficientes y poco comprometidos con el tema ambiental. Por tal motivo, la intención de proponer el uso de un dispositivo de exploración de trampas de hidrocarburos mediante señales electromagnéticas se justifica en las necesidades arriba mencionadas. Este dispositivo sería muy beneficioso para las compañías petrolíferas, ya que su método de exploración no invasivo basado en el uso de campos electromagnéticos, ayudaría a disminuir el impacto ambiental, por tanto este podría ser más eficiente y se tendría mayor relación costo beneficio.

El método de rastreo por campos electromagnéticos no es un tema nuevo para las actividades de exploración, pues es un método que se ha estado implementando hoy en día tanto para hallazgos de acuíferos en el desierto de Arabia, como para hallazgos arqueológicos de antepasados alrededor del mundo.^{4 5}

En este orden de ideas se hace necesario implementar un mecanismo donde los equipos comprometidos sean de fácil transporte para llegar a zonas de difícil acceso, ágil y eficiente, para obtener información de manera rápida donde las industrias puedan actuar y tomar decisiones de manera efectiva, con el fin de abarcar gran cantidad de la zona a analizar y permitan mejorar el desarrollo de la exploración terrestre. Los costos al implementar los métodos actuales son muy elevados, ya que al suponer la existencia de una trampa de petróleo por carencia de efectividad, se tiene que acceder a la perforación para acertar la existencia o no de posibles minerales en el interior del suelo lo cual conlleva a generar gastos innecesarios corriendo el riesgo de no descubrir yacimiento alguno. También se busca reducir esos costos con el dispositivo que se quiere implementar abarcando cualidades y un alto porcentaje de exactitud para el hallazgo de reservas de petróleo.

Todo lo anterior, a través de la precisión que se puede lograr con las múltiples frecuencias de barrido y que el mecanismo pueda desarrollar a través de un generador de señales electromagnéticas dando claridad sobre la existencia de minerales en el interior del suelo sin necesidad de llegar a perforar y generar gastos fuera de lo necesario.

⁴ Victoria Mousalli, Exploración de hidrocarburos, Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería, Departamento de geología general, pagina 4.

⁵ MIDDLETON, W y D. Price 1996 identification of activity areas by multi-element characterization of sediments from modern and archaeological house floors using inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy. Journal of Archaeological Science 23:1-15.

CAPITULO II. MARCO DE REFERENCIA

Posterior a la exposición del tema de estudio, es pertinente realizar una revisión de fuentes documentales relacionadas con el tema de investigación, así como definir un marco de referencia sobre el cual basar este proyecto. En el presente capítulo se presentan los antecedentes del estudio, los fundamentos teóricos y las bases legales asociadas al sector de exploración minera.

2.1 ANTECEDENTES

Han sido varios los investigadores dedicados a incursionar en el estudio de hallazgos de hidrocarburos, su objetivo ha sido la búsqueda constante de herramientas y métodos que permitan facilitar la exploración y explotación de los recursos encontrados al interior del suelo.⁶ Algunas de las investigaciones de mayor vinculación con el presente trabajo se presentan a continuación, con el fin de contribuir al logro de los objetivos del actual estudio.

La compañía Schlumberger en el año 2009, desarrolló una investigación la cual tuvo por objetivo implementar dos mecanismos para trabajar en el área marina rastreando posibles prospectos de petróleo; el primer mecanismo llamado transmisor se encargaba de transmitir señales con una fuente controlada remolcado por un bote el cual se encargaba de enviar señales de ondas electromagnéticas al segundo mecanismo nombrados receptores, estos receptores son ubicados a ciertas distancias en el fondo del mar, estos dispositivos tienen dos tipos de antenas unas que se encargan de medir los campos eléctricos y otros los campos magnéticos; el transmisor va a tener adherido unos dipolos que son la fuente emisora, desde el bote que remolca el transmisor se controla la calidad de la señal en tiempo real, y se envían tres tipos de señales con el fin de que el receptor pueda recibir la respuesta de estas señales y almacenarlas durante un tiempo en un registrador que posee, posteriormente los

⁶ Sánchez Albavera, Fernando. Serie Recursos Naturales e Infraestructura No.86; 2004-12

receptores se recuperan y se recogen los datos obtenidos de resistividad, los cuales ayudan analizar si el área muestreada es buen prospecto de yacimiento de petróleo o no.

Por otra parte la misma compañía realizó en el mismo año un estudio llamado “Levantamiento electromagnético somero” este se llevó a cabo en el desierto de Arabia, con el fin de identificar posibles superficies con acuíferos; este estudio consistía en el análisis de varias áreas y realizar un levantamiento de medición de resistividad por medio de estudios sísmicos y estudios electromagnéticos y determinar aquellas zonas en las cuales se encontraban acuíferos; todo esto con el fin de suplir una emergencia en cuanto a la escases de agua.⁷

Entre otras investigaciones tomadas como antecedentes esta la llamada “Caracterización electromagnética, una aplicación de la geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá)”, realizada por Serralde, Diana (2011) ,la cual tuvo como propósito elaborar un modelo de distribución de la susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica a tres niveles de profundidad asociados a la frecuencia y obtención mediante la aplicación de un método electromagnético inductivo denominado Slingram; e inferir sobre los contornos de la reserva arqueológica del Templo del Sol, a partir del análisis e interpretación de la tomografía electromagnética adquirida, la investigadora mediante este estudio logró realizar el análisis conjunto de las dos variables electromagnéticas, identificando la coherencia de la respuesta del medio a la acción de campo externo, de igual manera integró los modelos unidimensionales y bidimensionales y éstas con estrategias estadísticas y geodésicas para inferir el centro de la anomalía de fuente difusa; así como también identificar la fuente de anomalía electromagnética y caracterizarla como una fuente difusa o región alterada, que se extiende desde su centro hasta la superficie.

⁷ DAWOD, Mohamed, HALLINAN, Stephen, HERMANN Rolf, VAN KLEEF Frank. “Levantamientos electromagnetos someros”. Oilfield Review Spring 2009. Schlumberger. Pg. 20 a 25.

Finalmente cabe mencionar la investigación denominada “Aplicación de la inducción electromagnética para establecer patrones de actividad antrópica prehispánica”, cuyo objetivo era elaborar modelos predictivos de áreas de actividad intrayacimiento a partir de la lectura de anomalías en los campos electromagnéticos inducidos. Este proyecto se basaba en la aplicación de la inducción de campos electromagnéticos en el suelo de yacimientos arqueológicos previamente detectados, con el fin de determinar los posibles usos de estos. El principio de operación del equipo que se usó para dicho estudio se basa en los campos electromagnéticos que producen y reciben sus bobinas: la bobina de transmisión genera ondas electromagnéticas que penetran el suelo, si cualquier conductor está presente, el campo electromagnético genera corrientes parásitas que a su vez producen un campo secundario que emerge desde el suelo y es detectado por la bobina de recepción. La señal se transforma en una indicación analógica o digital que se traduce en una tabla de datos que permite las lecturas (Legal y Garrett, 1982).

La importancia de la implementación de métodos de prospección geofísica radica en que cuando se aplican a la arqueología, permiten evaluar el potencial de un yacimiento, ayudan a planificar la posterior intervención, facilita la toma de decisiones previas a la extracción y destrucción de los contextos y finalmente, favorece la preservación de los yacimientos e influye en el ahorro de tiempo y dinero.

De la misma manera otros tantos más han dedicado su esfuerzo y dedicación a este tipo de investigaciones, sin embargo en este caso en particular se consideraran como referencia histórica o antecedentes las antes citadas.⁸

⁸ PONCE, Rocio, ARGOTE, Denisse, CHAVEZ, Rene M. CAMARA, Encarnación. “Empleo de los métodos geofísicos en la prospección arqueológica urbana: La Basílica de nuestra señora de la salud, Pátzcuaro, Mexico “. Trabajos de Prehistoria 61, N°2, 2004 Pg. 11 a 23.

2.2 FUNDAMENTOS TEORICOS

2.2.1 El Suelo

2.2.1.1 Definición

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes y esenciales para la subsistencia de cualquier especie humana. Este se forma gracias a la combinación de cinco elementos, que son: material parental, topografía, clima, tiempo y organismos vivos; y este a su vez está compuesto por: materia mineral, materia orgánica, agua y aire.

Figura 1. El Suelo



Fuente: <https://www.google.com.co/search?q=el+suelo&biw=1280&bih>

También se define el suelo como la parte superficial de la corteza terrestre que se origina a partir de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de los seres vivos.

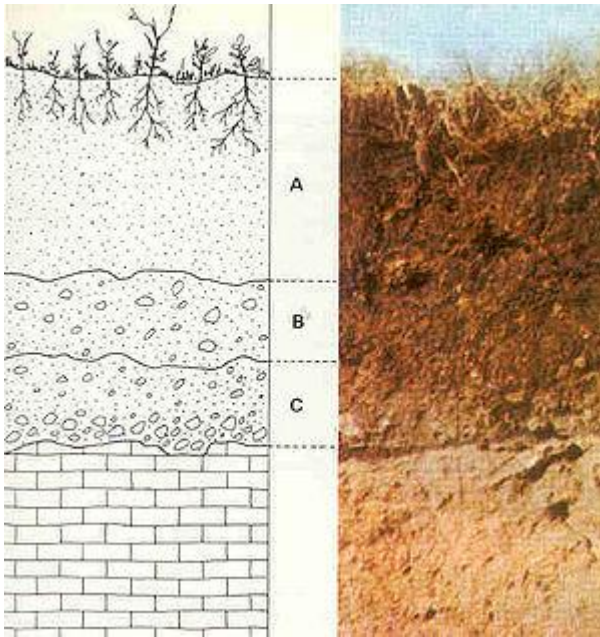
Por otra parte es importante tener presente que existen procesos que contribuyen a su formación como por ejemplo: la deposición eólica, sedimentación en cursos de agua, meteorización, y deposición de material orgánico.

2.2.1.2 Capas del Suelo y características

El suelo está formado por varias capas, las cuales reciben el nombre de horizontes, que se constituyen en una serie de niveles horizontales que se desarrollan internamente y cada una de ellas poseen diferentes características de

composición como: textura, adherencia, cohesión, absorción de agua, retención de agua, materiales medios, materiales gruesos, entre otros. Ver figura 2

Figura 2. Horizontes del suelo



Fuente: Hole Francis D., J.B. Campbell. 1985. Soil landscape analysis

Horizonte O, capa de humus: Es la capa más superficial del suelo, en el que se encuentran los depósitos de materia vegetal, conformado por desechos frescos y parcialmente descompuestos como hojas, ramas, musgos y líquenes, que se han acumulado sobre la superficie. En este horizonte la saturación de agua no se da por periodos prolongados debido al transporte vertical que se produce al interior del suelo.

Horizonte A, o zona de lixiviación: Ubicada debajo del horizonte O, en el que se enraíza la vegetación. Este horizonte es generalmente de color oscuro debido a la abundancia de humus. En climas áridos y cálidos donde prácticamente no hay acumulación de materia orgánica, los horizontes de superficie pueden ser menos oscuros que los horizontes subyacentes contiguos

Esta zona es también llamada de lavado vertical o lixiviación porque el agua se infiltra y penetra verticalmente desde la superficie arrastrando sustancias acumuladas por absorción. Otra de sus características es que este horizonte los fragmentos son de tamaño fino y compuestos solubles.

Horizonte B o zona de precipitado: Esta ubicado debajo de la zona A, este carece de humus por lo tanto su color es un poco más claro que el horizonte anterior tornando a un color pardo o rojo, en esta zona llegan a depositarse las sustancias y materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos, entre otros, arrastrados desde la superficie. Una de las características de esta zona es que posee revestimientos calcáreos compuestos por carbonato de calcio generalmente calcita, aunque con frecuencia presenta rastros de magnesita y otros carbonatos.

Horizonte C o zona mineral: Esta ubicada debajo de la zona B, y conformado por la parte más alta del material rocoso in situ, se encuentran los sedimentos, saprolita y la roca madre en estado no consolidado, es decir que en esta zona se encuentran fragmentos de la roca madre rodeados de partículas finas que provienen de las capas superiores; esta capa no contiene material orgánico.

Horizonte D, R, o zona Roca madre: Esta zona conformada por material rocoso profundo que no ha sufrido alteraciones químicas ni físicas. “Esta capa es lo suficientemente compacta como para no romperse con la mano ni deshacerse con el agua”.⁹

2.2.1.3 Tipos de suelo

Los suelos se clasifican de acuerdo a sus características y a su función.

Según sus características se clasifican en:

Litosoles: Este suelo tiende a aparecer en una zona superficial rocosa y a veces en cuevas; estos no poseen buen espesor y son de poca vegetación.

⁹ <http://ingagronomiacmu.blogspot.com/2010/02/estructura-del-suelo.html>

Cambisoles: Estos suelos acumulan arcillas y se denominan también jóvenes.

Luvisoles: Está formado por una capa u horizonte resultado de la acumulación abundante de arcillas.

Acrisoles: Estos suelos poseen menor acumulación de arcilla que los Luvisoles.

Gleysoles: Estos poseen mucha cantidad de agua en forma permanente o a veces en forma semipermanente.

Fluvisoles: Estos suelos han sido originados gracias a la lluvia, y se caracterizan por poseer calcio.

Rendzina: Son suelos que poseen bastante materia orgánica.

Vertisoles: Se caracterizan por su color negro, son arcillosos y se encuentran en zonas de poca pendiente.

Los suelos según su funcionalidad pueden clasificarse en:

Suelos arenosos: Estos suelos se caracterizan por no retener agua, y poseer un bajo contenido de materia orgánica, por tal razón no son aptos para actividades como la agricultura.

Suelos calizos: Estos suelos poseen gran cantidad de sales calcáreas; su color generalmente es blanco, por tanto se consideran áridos y secos, razón por la que al igual que los suelos arenosos tampoco son aptos para actividades agrícolas.

Suelos humíferos: Estos son conocidos comúnmente como tierra negra, pues debido a su alto contenido de materia orgánica en descomposición retienen gran cantidad de agua y por ende son aptos para actividades de agricultura.

Suelos arcillosos: Se caracterizan por poseer pequeñas partículas de color amarillo, retienen el agua en charcos. Estos suelos si son mezclados con humus suelen resultar aptos para el cultivo de algunos productos.

Suelos pedregosos: Este suelo está formado por gran cantidad de rocas y piedras, se caracterizan porque no retienen agua y por ende son suelos no aptos para el cultivo.

Suelos mixtos: Son suelos que resultan de la mezcla de suelo arenoso y arcilloso.

2.2.2 Hidrocarburos

2.2.2.1 Definición

Los hidrocarburos pueden definirse como compuestos orgánicos que contienen diferentes combinaciones de carbono e hidrógeno, estos se presentan en la naturaleza como gases, líquidos, grasas y, a veces, sólidos. Por ejemplo El petróleo crudo, en cualquiera de sus formas, y el gas natural.

Según los científicos se confirma que el petróleo y el gas natural se formaron hace millones de años, por la descomposición y transformación de restos de animales y plantas, en especial por el zooplancton y algas. Es decir que grandes cantidades de restos orgánicos fueron acumulándose en capas y depositándose en zonas sin oxígeno (como en el fondo de los mares o lagunas del pasado geológico). En este lapso de tiempo, también se fueron depositando capas con sedimentos sobre restos orgánicos, es decir que los efectos de la presión y de las altas temperaturas del subsuelo originaron la descomposición paulatina de los restos hasta transformarse en hidrocarburos.

Los hidrocarburos a presión y temperatura normal, se presentan en tres formas, teniendo en cuenta la complejidad de sus moléculas.

a. Líquida: Como el caso del petróleo, aceites, lubricantes, kerex y diesel.

b. Sólida: Entre los cuales se pueden citar; bitumen, asfalto, brea, y cera.

c. Gaseosa: En este se encuentra el gas natural (propano + butano).

2.2.3 El Petróleo

2.2.3.1 Definición

Etimológicamente petróleo significa petrae (piedra) y oleúm (aceite) proviene del vocablo latino “petroleum”; este hidrocarburo resulta de la mezcla de sustancias orgánicas como el carbono, hidrogeno, azufre, nitrógeno y oxígeno. El petróleo es encontrado debajo de la tierra debido a la acumulación de materia orgánica en descomposición y puede acumularse en trampas geológicas, en la que una vez ha sido identificada su existencia es extraído mediante perforación de pozos, es necesario tener presente que en el lugar donde se encuentra este mineral la vegetación es muy diferente, puesto que este hidrocarburo mata la hierba y otros vegetales próximos.

Este hidrocarburo se encuentra en la naturaleza como una sustancia de color negra o amarillosa depende de su grado de viscosidad, su estado es líquido; además tiene un olor característico desagradable y flota en el agua. Se considera como un recurso natural no renovable, y la fuente de energía más importante del planeta. De este se derivan los gases, la gasolina, gasóleos, combustibles para aviones, fuelóleos, aceites, asfaltos y aditivos entre otros.

El petróleo lo obtenían desde hace más de 4000 años a. de. c, en el Asia menor mediante filtraciones naturales, era utilizado como combustible, lubricante de ruedas así como también como impermeabilizante de barcos. En varias regiones del viejo mundo y del nuevo, era útil para encender lámparas, sin embargo para el siglo XIX se deja de utilizar este y comenzó a usarse el aceite de ballena para encender estos aparatos, en este siglo fue descubierto el queroseno por un proceso de refinación del petróleo y también fue usado para encender lámparas.

En el mundo se encuentran varias clases o tipos de petróleo crudo, y su diferencia radica en su alto contenido de azufre y en su nivel de viscosidad. Internacionalmente dentro del mercado solo ciertos tipos de petróleo sirven para la fijación de precios, es decir sirven como “marcadores” en el mercado internacional.

En el mercado internacional solo algunos sirven para la fijación de precios, ya sea sobre la base de diferenciales respecto a un crudo que sirven como “marcadores” en el mercado internacional, uno de ellos el West Texas Intermediate (WTI), el Dubai ,o el Brenty . Entre estos, la cotización o el precio del WTI “corresponde a la refinería”, para la comercialización de petróleo crudo en continente Americano.

2.2.3.2 Composición

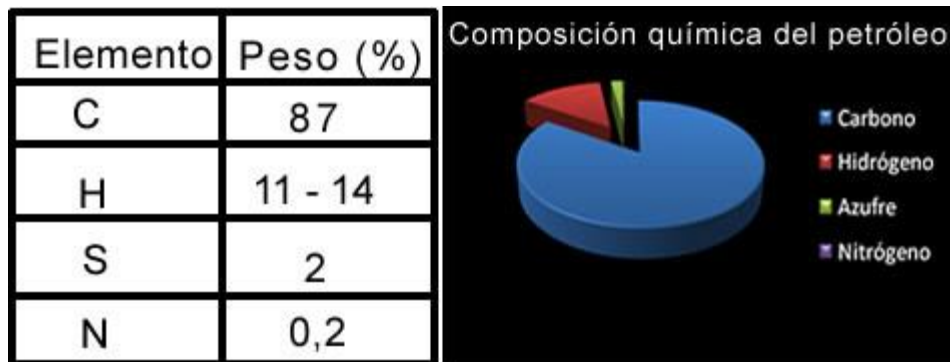
La composición de petróleo está basada en la unión de varios compuestos orgánicos, los cuales a su vez están constituidos por átomos de carbono y átomos de hidrogeno.

Las cadenas constituidas por átomos de carbono e hidrogeno en diferentes combinaciones reciben el nombre de hidrocarburos que es el componente principal y molecular del petróleo.

La cantidad de átomos de carbono y la forma en la que están dispuestos dentro de las moléculas de los distintos compuestos le brinda al petróleo distintas propiedades físicas y químicas. Es así como los hidrocarburos que se componen por 1 a 4 átomos de carbono son gaseosos, aquellos que contienen de 5 a 20 son líquidos, y aquellos que poseen más de 20 son sólidos a temperatura ambiente.

En este sentido el petróleo crudo puede variar su composición, ya que depende del tipo de yacimiento del que haya sido originado, sin embargo en promedio se puede considerar que contiene entre 83 y 87% de carbono, 11 y 14% de hidrogeno, entre 0 y 2% de azufre y 0.2 de nitrógeno.

Figura 3. Composición química del petróleo



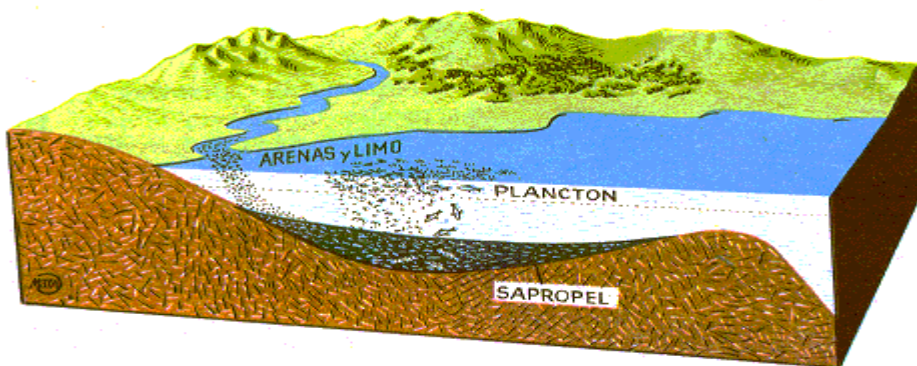
Fuente: <http://weblessondelpetroleo.wikispaces.com/file/view/composicion.jpg>

2.2.3.3 Formación

Se conocen varias teorías acerca del origen del petróleo, pero éstas pueden resumirse en dos teorías una Orgánica e Inorgánica.

Según la teoría orgánica los depósitos más antiguos de petróleo crudo han sido formados aproximadamente hace 40 millones de años. De acuerdo a esta teoría el petróleo se origina por la gran cantidad de compuestos orgánicos en descomposición que son transportadas por arroyos y ríos que llegan a mares o lagos.

Figura 4. Teoría orgánica del origen del petróleo



Fuente: <http://soymino.wordpress.com/2011/01/22/origen-del-petroleo/>

La teoría explica que en esos periodos la mayor parte de la superficie de la tierra, que en la actualidad es seca en ese entonces estaba cubierta por mares, en los cuales abundaban las plantas y animales, estos al morir se situaron en el fondo del mar y fueron enterrados por limos y arcillas los cuales previenen la descomposición del material orgánico, y permiten la acumulación de este; constituyéndose en la materia prima de la que se forma el petróleo crudo.

Debido a la acción bacteriológica y química los sedimentos continuaron formándose en el fondo del mar, y a medida que aumentaba su enterramiento, estos se iban comprimiendo en láminas de rocas sedimentarias, llamadas estratos. Es decir que las grandes cantidades de petróleo recién formados fueron atrapadas dentro de las rocas porosas, como las piedras areniscas o calizas. De esta manera la conversión del material orgánico al petróleo se llama catégenesis y está dada por la presión causada por el enterramiento, alteración termal, la temperatura, y la degradación, factores que resultan de la profundidad, la acción bacteriana en un ambiente químico no oxidante y cerrado, y la radioactividad. Es así como el geólogo busca encontrar estas trampas, que pueden estar cerca de la superficie o encontrarse a cientos o miles de metros de profundidad.

La teoría inorgánica, fue dada a comienzos de los años 1800, momento en que los científicos creían que el petróleo era un residuo, según esta teoría se pensaba que los hidrocarburos provienen desde las profundidades de la tierra, de materiales que fueron incorporados cuando la tierra se formó como por ejemplo del metano el cual es el resultado de la unión de un átomo de carbono con cuatro átomos de hidrogeno (CH_4), y que al ser sometido a altas temperaturas y presiones en capas muy profundas de la tierra pudo haber originado el petróleo.¹⁰

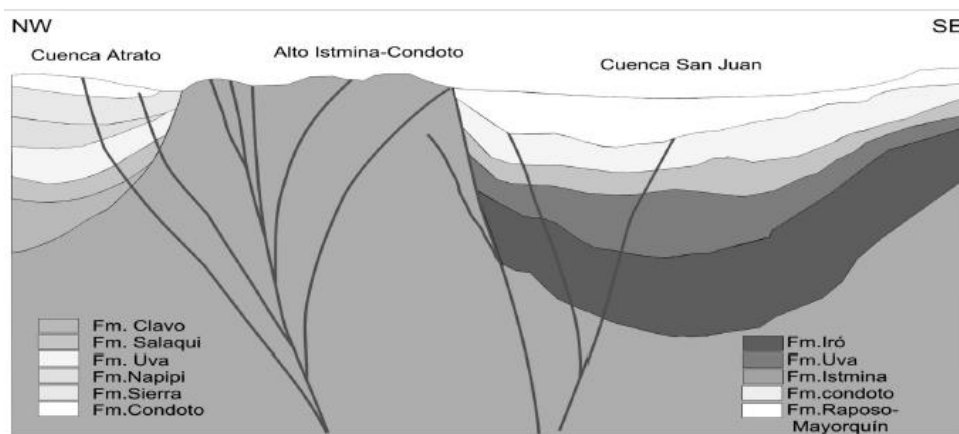
2.2.3.3.1 Cuencas Sedimentarias

¹⁰ Geoffrey P. Glasby (26). «Abiogenic Origin of Hydrocarbons: An Historical Overview. Pg 26

Una cuenca sedimentaria, es una acumulación de sedimentos que se produce por el desgaste de la superficie terrestre, por tanto puede decirse que es una zona deprimida de la corteza terrestre de origen tectónico en la cual se acumulan sedimentos. Una cuenca puede abarcar desde cientos de kilómetros cuadrados hasta miles de kilómetros cuadrados en área, y cientos de metros, hasta miles de metros de espesor de sedimentos que la forman.

Las cuencas sedimentarias sobre yacen a un complejo de rocas metamórficas e ígneas, en zonas continentales llamadas basamento es decir que las cuencas ocupan una depresión en la superficie de este.

Figura 5. Muestra de basamento. Cuenca San Juan y cuenca Atrato



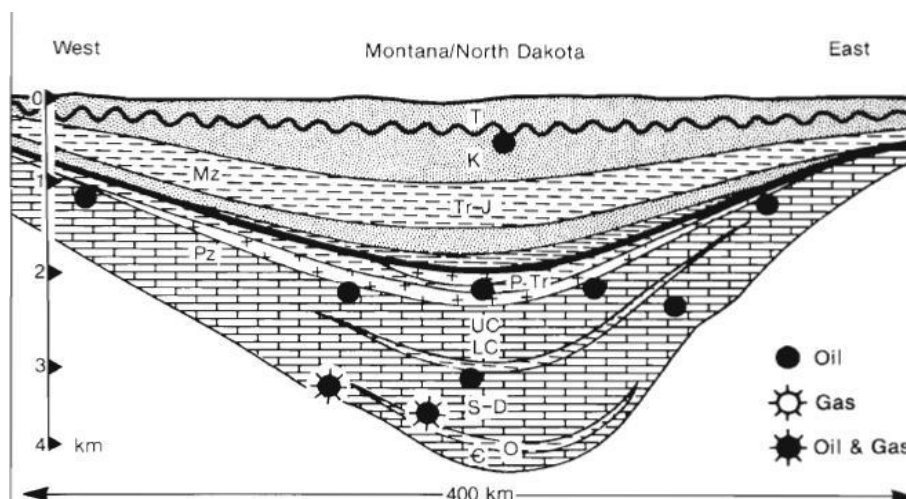
Fuente: BGR - Ingeominas, 1989, Rojas, O., 1967, Dunia Consultores Ltda., 2006.

Estas cuencas sedimentarias se consideran estructuras geológicas que recobran gran importancia en la geología destinada al petróleo, pues los hidrocarburos se originan en estas en cantidades considerables. Es imperante destacar que se debe conocer muy bien el origen y formación de la cuenca, pues esto proporcionará a los geólogos la realización de los estudios de manera oportuna en la fase de exploración del petróleo. Las cuencas se clasifican según su formación ya sea tectónica, extensional, compresiva o separación, y depende del lugar donde se encuentre ubicada geográficamente, en mares, en continentes, o en continente-mar.

Los tipos de cuencas dependen del lugar donde ocurre su formación que puede ser en la corteza continental o la corteza intermedia de la tierra, de igual manera se debe tener presente para esta clasificación el ambiente tectónico que puede ser para aquellas que se originan en la corteza continental; por extensión y comprensión , y para las originadas en la corteza intermedia este ambiente puede ser de margen divergente y de margen convergente, por otro lado según la forma de la cuenca para las de corteza continental será en el interior o en foreland y para las de corteza intermedia serán de Rif, Pull Apart, Ante arco, Post arco y colisión.

Cuenca Interior: Es un tipo de cuenca simple, su perfil es carente de simetría, se pueden encontrar en zonas paleozoicas al interior de los continentes, se puede decir que el rango de depósito en estas es mínimo. Se piensa que están asociadas a zonas de puntos calientes. Este tipo de cuencas se ubican en la parte central de los continentes y se rellenan con sedimentos mezclados como los siliciclasticos o carbonatados. Las cuencas interiores constituyen el 2% del total de todas las cuencas petroleras del mundo y el 1% de las cuencas que contienen gas; por otra parte las trampas que esta constituye son principalmente de tipo estratigráfico.

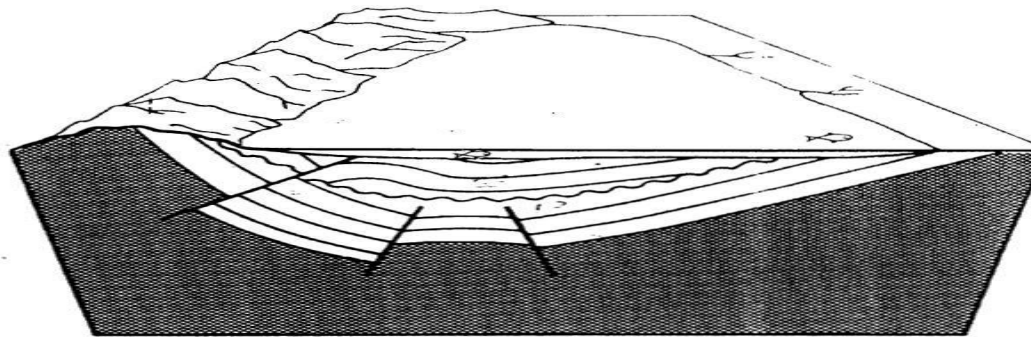
Figura 6.Cuenca interior



Fuente: formerly Revista Geológica de Chile www.andeanageology.cl

Cuenca Foreland: Estas cuencas son de forma lineal y elíptica, se originan dentro de los continentes al igual que las cuencas interiores, y tienen características parecidas a estas. Los tipos de sedimentos que éstas contienen provienen de levantamientos orogénicos en el exterior de la cuenca, y su rango y volumen son altos. Estas poseen grandes trampas son de tipo estratigráfico y estructural; contienen un cuarto de las reservas de aceite y gas del mundo.

Figura 7.Cuenca Foreland

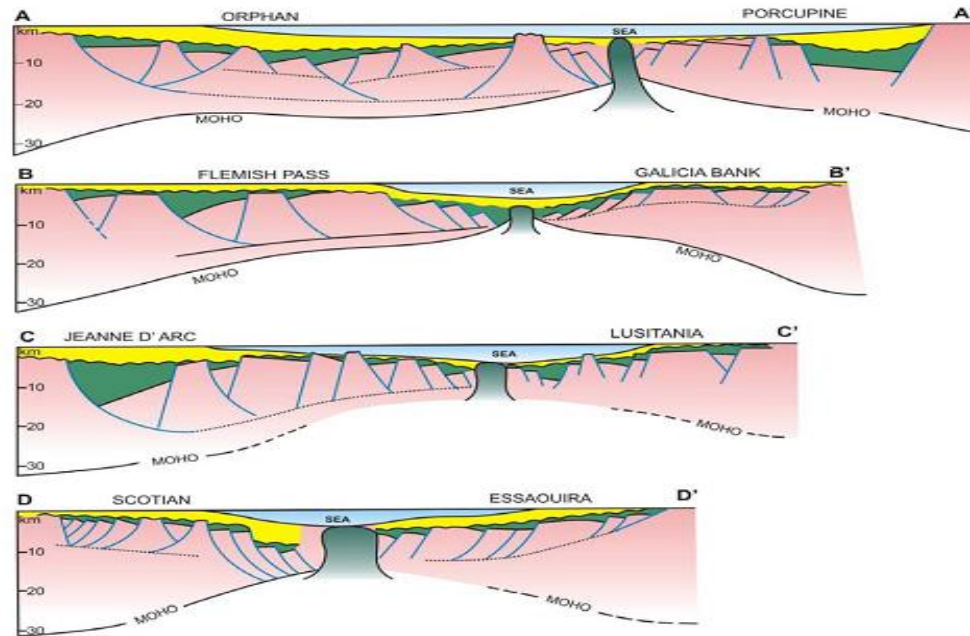


Fuente: formerly Revista Geológica de Chile www.andeangeology.cl

Cuenca Tipo Rift: Estas cuencas son pequeñas, lineares e irregulares y captan gran cantidad de sedimentos, se originaron en el periodo paleozoico superior, terciario y mesozoico; ubicados cerca de las zonas continentales. El relleno de esta cuenca es de sedimentos clásticos y en algunas ocasiones se introduce material oceánico pero en su primera etapa se depositan carbonatos; es decir que se trata de cuencas extensionales con formas irregulares así como de trampas estratigráficas y estructurales. En este tipo de cuencas los hidrocarburos migran de forma lateral y a corta distancia. Por otra parte este tipo de cuenca representan más o menos el 5% de las cuencas productoras y altamente productivas constituyéndose en el 10% de las reservas mundiales (12% de aceite y 4% de gas). Su gradiente geotérmico es muy alto.¹¹

¹¹ UPME. Cadena de petróleo 2013, República de Colombia Prosperidad para Todos

Figura 8. Cuenca tipo Rift



Fuente: formerly Revista Geológica de Chile www.andeanageology.cl

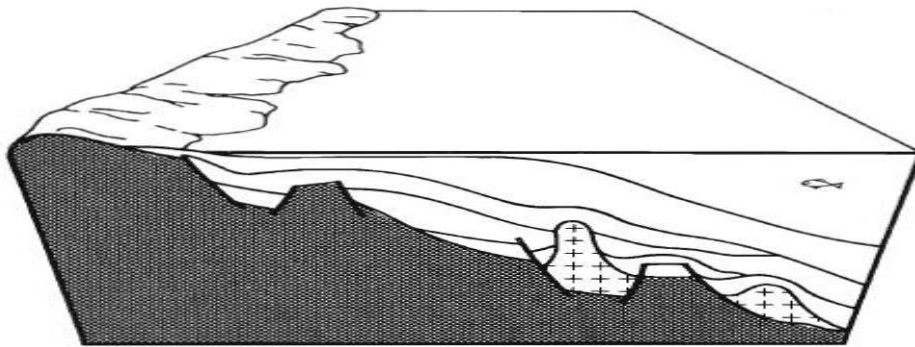
Cuenca Pull Apart: Son de forma lineal y asimétrica, poseen gran cantidad de sedimentos, se encuentran ubicadas entre la corteza continental y la corteza oceánica, este tipo de cuencas inicialmente son de tipo Rift en el periodo precámbrico, su contenido sedimentario es de origen clástico no marino, seguido por depósitos de evaporitas y carbonatos, originando así condiciones marinas abiertas y diapiros de sal. El tipo de trampas que estas cuencas conforman son de tipo estructural anticlinal¹² tipo Rollover. Este tipo de cuenca representa el 18% de las cuencas a nivel mundial, sin embargo su ubicación fuera de costa y aledañas a los continentes, les permiten tener fácil acceso a las nuevas tecnologías de la

¹² El anticlinal es una deformación en pliegue formado en rocas dispuestas en estratos que resulta de esfuerzos tectónicos de tipo diverso. En general, un pliegue anticlinal puede producirse por presiones tangenciales, por deslizamiento o corrimiento, por intrusión o eyección de materiales desde áreas más profundas, o por deformaciones verticales del sustrato.

industria petrolera. Solo el diez de estas cuencas son productoras.¹³ En estas cuencas el gradiente geotérmico es de normal a bajo.

El principal problema que se presenta en este tipo de cuenca Pull Apart, es que la roca madre no alcanza la suficiente madurez (no se biodegrada) por lo tanto estas cuencas no alcanza a originar ningún tipo de hidrocarburo.

Figura 9.Cuenca Pull Apart



Fuente: Sedimentary Geology. Massachusetts Institute of Technology

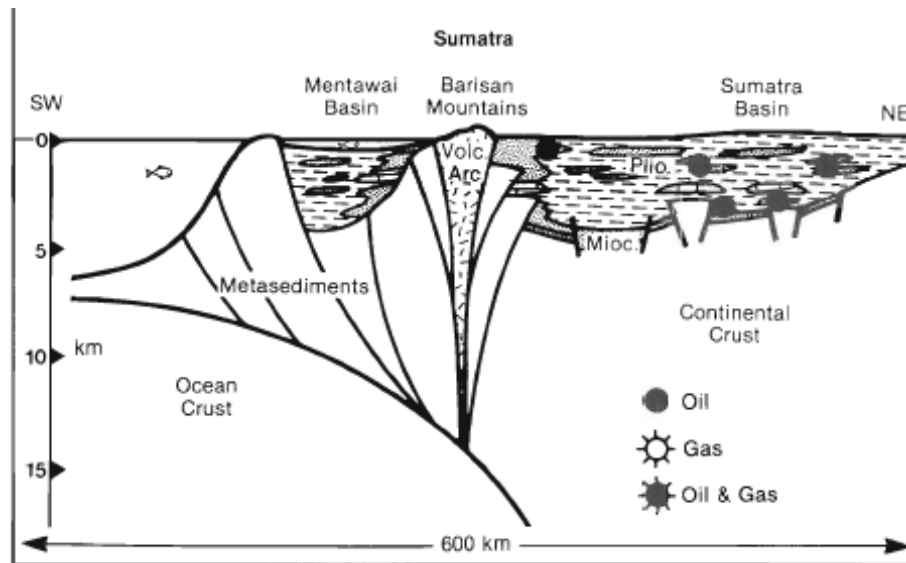
Cuencas Ante arco, Post Arco y de Colisión: Este tipo de cuencas se forman a partir de una zona convergente, y su mayor inconveniente es la sobre maduración de la roca madre, por este motivo son pequeñas, lineares, y se forman encima de la corteza intermedia, su origen se da en la edad cretácica y terciaria; sus sedimentos son inmaduros y se desarrollan rápidamente; de igual manera se destruyen de manera rápida a causa de la convergencia.

Las cuencas Post Arco por su parte, se ubican cerca de la zona de subducción, y se localizan atrás del arco de islas, por lo tanto reciben el nombre de sedimentos de aguas someras, la temperatura de estas cuencas es alta debido a la presencia de arcos volcánicos.

¹³ Ibídem, Pág. 26

Las cuencas de Ante Arco se localizan entre el arco de Islas y el océano, y son rellenadas con sedimentos que pueden ser de tipo fluvial hasta de aguas más profundas. Su flujo de calor es bajo.

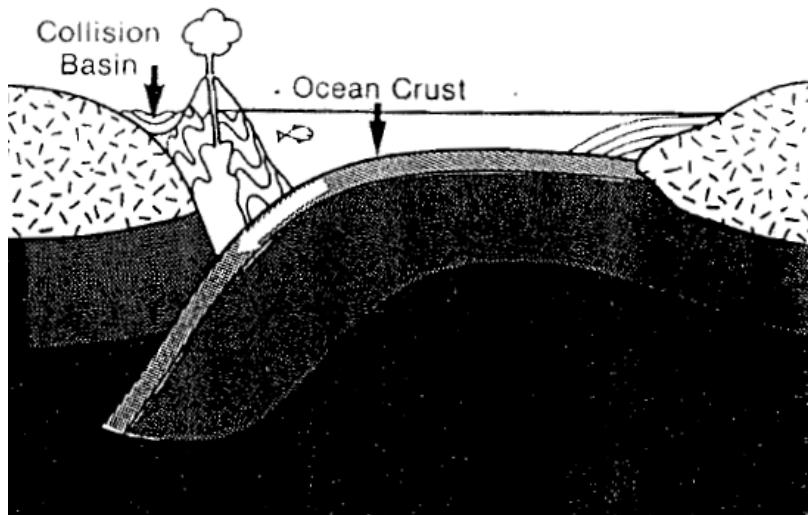
Figura 10. cuencas Ante arco Y Post Arco



Fuente: Chungara volumen 30, N° 1, 1998 (Impreso 1999). Páginas 7-39
Universidad de Tarapacá. Arica - Chile

Las cuencas de colisión se localizan a lo largo de la unión de dos continentes dada por un choque; de igual manera por el choque de una placa continental y la trinchera. Estas se presentan de manera compresiva pero pueden llegar a tener fallas de dirección, sus sedimentos por lo general es clástico. Su gradiente de temperatura es alto.

Figura 11.Cuenca de colisión



Fuente: <https://www.google.com.co/search?q=cuenca+antearco&biw=1280&bih>

Por todo lo anterior es vital para la geología aplicada al petróleo el estudio de las estructuras y de los ambientes sedimentarios, pues estos también influyen de una manera significativa en la etapa de exploración en el momento en que se realiza su estudio.

Si se quiere encontrar una roca que se haya producido en un medio apto para la existencia de petróleo mediante la formación en un ambiente sedimentológico propio, se debe centrar su búsqueda en una cuenca sedimentaria que está compuesta por materia orgánica depositada millones de años atrás. Para lo cual, se ejecutarán estudios geológicos de la superficie, se toman muestras del terreno, se examina con Rayos X, se hacen perforaciones para estudiar los estratos y, por último, con toda esa información se efectúa un mapa geológico de la zona y la región que se estudia.

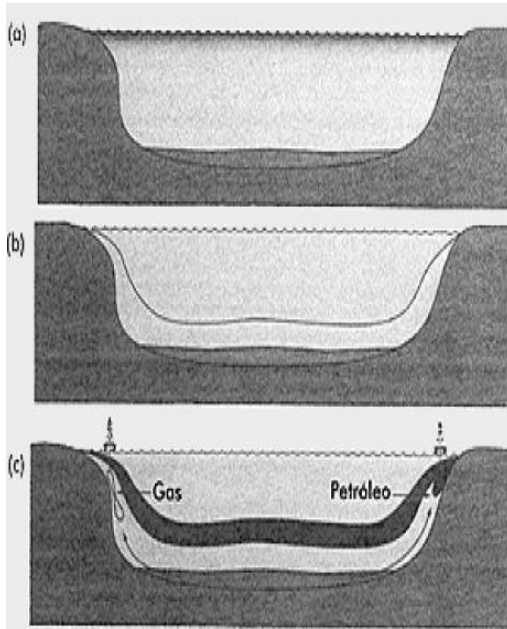
2.2.3.4 Etapas y Métodos de la Exploración del Petróleo

“La exploración en búsqueda de petróleo y gas ha sido considerado un arte más que una ciencia, integra métodos antiguos con las técnicas más modernas”.¹⁴ Para la búsqueda y exploración de prospectos de hidrocarburos no existe un método científico exacto, hay que implementar cantidad de métodos y realizar multitud de tareas para el estudio, el análisis y el hallazgo de yacimientos de petróleo. Los métodos empleados para la exploración del suelo, dependen del tipo de terreno; pueden ser métodos Geológicos (estudian la superficie del suelo), Geofísicos (estudian el interior del suelo) o Geoquímicos (estudian las composiciones del suelo). Para entender mejor los métodos antes mencionados, primero nos adentraremos un poco en la explicación del origen, formación y la acumulación del petróleo en las capas terrestres.

El petróleo es un producto de compuestos químicos, integrado por partes sólidas, líquidas y gaseosas, formados por átomos primordialmente de carbono e hidrogeno y de otros en menor proporción como nitrógeno, azufre, oxígeno y otros metales. Se forman en depósitos de rocas sedimentarias y solamente donde hubo existencia de mar. Posee un color particular (entre el ámbar y el negro) y contextura aceitosa. Su origen se relaciona con la acumulación de grandes cantidades de compuestos orgánicos que fueron depositados de manera continua en cuencas sedimentarias alrededor del mundo, en especial depósitos marinos que fueron transportados por arroyos y ríos; ambientes que producen la mayor parte de organismos microscópicos, en especial fitoplancton donde se juntan con el material orgánico y son enterrados en depósitos de limos y arcillas que impiden la descomposición total del material orgánico transportado, permitiendo así su acumulación al llegar al sedimento marino donde se transformara más adelante en petróleo y gas.

¹⁴ Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquía. Junio del 2000. Ejemplar N° 20. Págs.: 119-135. <http://www.geocities.com/historiaingenieria/historiadeingenieria.html>. Proyectos de inversión en ingeniería su metodología. Victoria Eugenia Erossa Martín.Limusa1999p.p. 14-28

Figura 12. Formación de sedimentos marinos en cuencas oceánicas



- a) Materiales iniciales ricos en carbono, formados en las aguas superficiales, se acumulan en aguas profundas donde no pueden ser consumidos por otros organismos.
- b) Acumulaciones posteriores de sedimentos sellan los materiales ricos en carbono; las altas temperaturas y presiones transforman este material en petróleo y gas.
- c) Acumulaciones de sedimentos adicionales comprimen los depósitos originales, empujando el petróleo y gas, los cuales emigran hacia rocas más permeables, generalmente arenas y areniscas.

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/88739731/III-Unidad-Geologia>

Las características y el volumen del yacimiento, dependen de la cantidad de enterramiento descargada por los arroyos y ríos en el sedimento marino, junto con algunos factores fundamentales como la presión, la temperatura y la degradación causada por el tiempo en el proceso de deposición y descomposición del material orgánico; estos factores resultan de la profundidad y la acción bacteriana en un ambiente químico y cerrado.

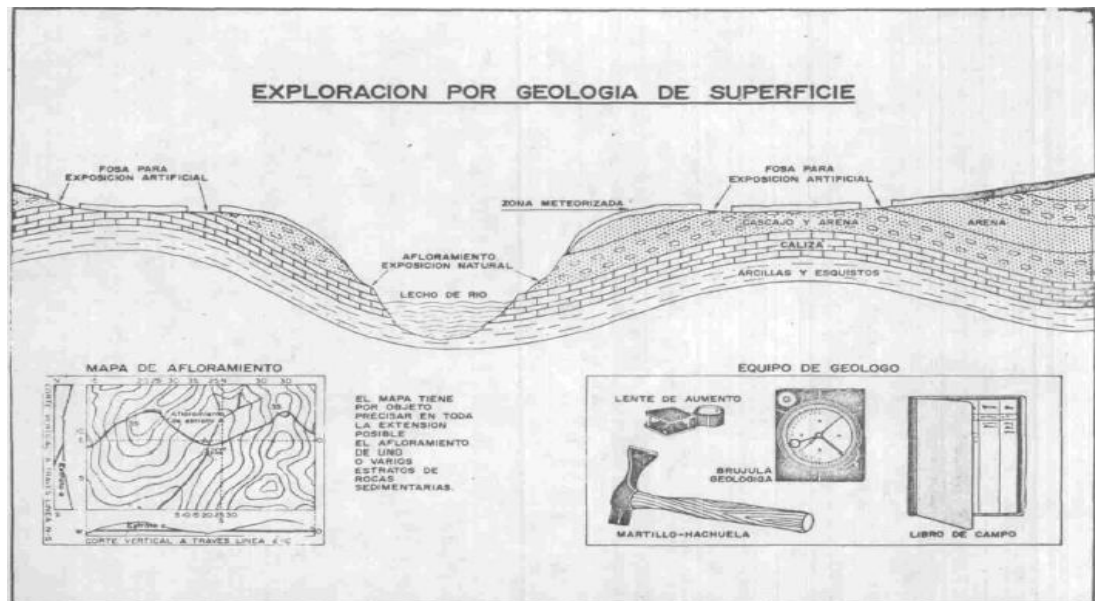
Al ser un compuesto en estado líquido o gaseoso, no permanece generalmente en su lugar de origen, pues su composición liviana le permite filtrarse por las rocas porosas de manera vertical o lateral, alcanzando distancias considerables hasta encontrar una salida al exterior donde se evaporara o se oxidara al estar en contacto con el aire tendiendo a desaparecer, o hasta encontrar en su trayecto por la roca porosa, una roca impermeable que impida su recorrido generando así una trampa de petróleo.^{15 16}

¹⁵ Magoon LB y Dow WG: "The Petroleum System", en Magoon LB y Dow WG (editores): The Petroleum System-From Source to Trap, AAPG Memoir 60. Tulsa: AAPG (1994): 3-24

2.2.3.4.1 Identificación del Área De Interés y Método Geológico

El método de exploración Geológico se encarga de buscar minuciosamente en la superficie del suelo indicaciones de posible existencia de petróleo, mirando características de rocas expuestas, localizando afloramientos de asfaltos, depósitos naturales de parafina, derrames de petróleo líquido o emanaciones de gas, etc., con el fin de seleccionar una región para la exploración cuando se encuentran condiciones favorables. El terreno es estudiado y analizado más a fondo, para encontrar estructuras en las que el petróleo pudo acumularse, se realiza un levantamiento topográfico acompañado de un mapa geológico, donde se involucra toda información relacionada a la exploración del terreno, como afloramientos de estratos que existen en el área, tipo de vegetación que crece, ríos existentes, régimen de lluvias, tipo de rocas exploradas, etc., con el fin de esclarecer la información obtenida del terreno analizado.

Figura 13. Mapa Geológico

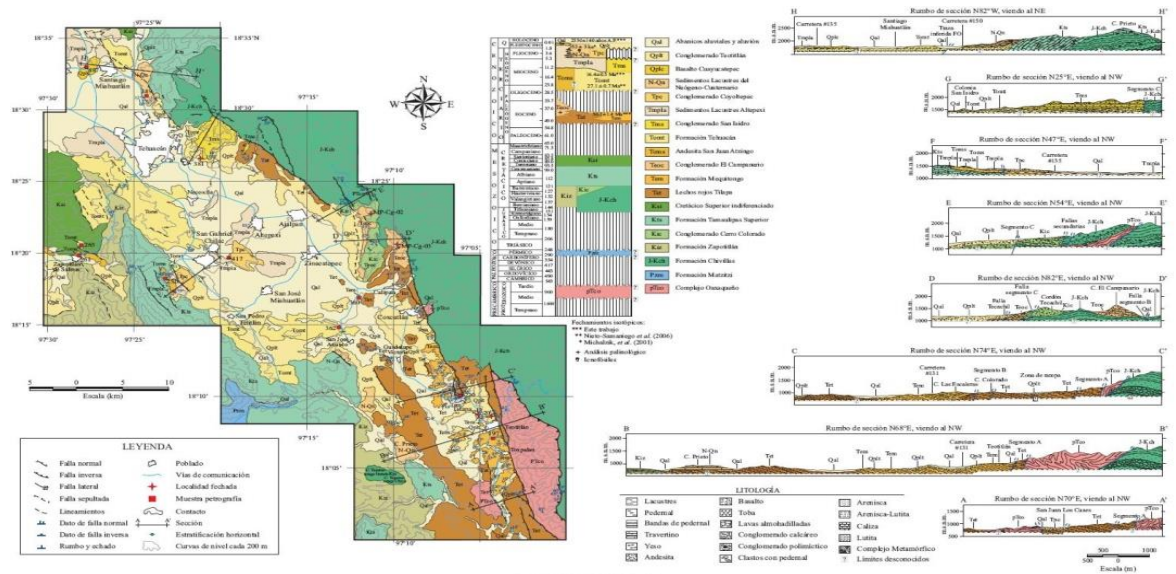


Fuente: Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., compiladores. 2007. Mapa Geológico.

¹⁶ Welte DH y Yukler MA: "Petroleum Origin and Accumulation in Basin Evolution – A Quantitative Model", AAPG Bulletin 65, Nº 8, (Agosto de 1981): 1387-1396.

En aquellos terrenos de difícil acceso se usa la ayuda de la Aerofotogeología, que consiste en realizar levantamientos del área con fotos tomadas desde el aire, evidenciando espacios ocultos en especial recubiertos por bosques muy densos, recolectando información para complementar y así dar precisión del terreno a explorar.

Figura 14. Mapa geológico. Área de estudio con afloramientos de rocas pre cenozoicas



Fuente:.. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm. 2, 2005

Este método se usa mucho hoy en día como método inicial de la exploración, ya que da una idea de la zona que tiene condiciones ideales para la presencia de mantos sedimentarios, dando paso, una vez se evidencie posible existencia de hidrocarburos en el interior del suelo, al método Geofísico.

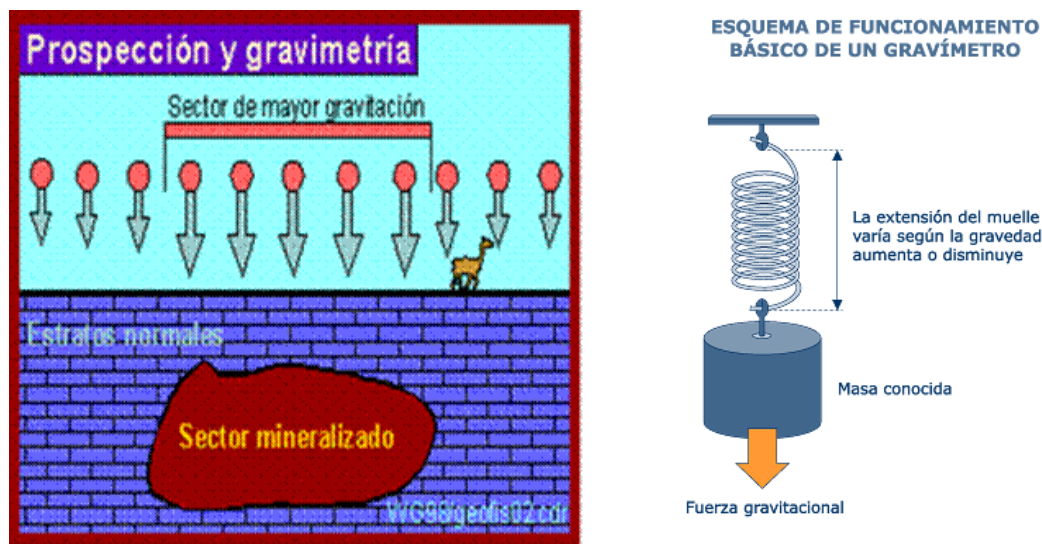
2.2.3.4.2 Detección de Trampas y Método Geofísico

Consiste en la exploración interna del suelo con uso de técnicas como la Gravimetría, la Sísmica y la Magnetometría. La Geofísica se empieza a emplear más o menos desde el año 1920 para la exploración de yacimientos de petróleo y es considerado a partir de esa época como el método más factible y preciso para la exploración de áreas grandes cubiertas por agua, las técnicas empleadas, arrojan una imagen más o menos aproximada de la estructura interna de las capas

terrestres. El método Geofísico busca definir contrastes de inhomogeneidad y densidad en la parte de la Tierra, por lo tanto el uso de esas técnicas ayudan a la definición de esos contrastes internos.

Con la técnica Gravimétrica se exploran las áreas utilizando aparatos muy sensibles llamados gravímetros acompañado de una balanza de torsión y un péndulo que ayudan a medir las pequeñas variaciones de fuerza de gravedad en las diferentes zonas de la corteza terrestre, este valor de gravedad depende del achatamiento terrestre, la fuerza centrífuga, la altitud y la densidad presente en las rocas, permitiendo diferenciar que tipo de roca existe en el interior, la distribución que tienen dependiendo las propiedades magnéticas y la ubicación de aguas subterráneas (domos salinos). Con los datos obtenidos se elabora un mapa del suelo permitiendo determinar en qué zonas es más probable la existencia de hidrocarburos y determinar el tamaño y la profundidad de las posibles trampas registradas.

Figura 15. Comportamiento de la gravimetría al medir diferencias muy finas en la gravedad

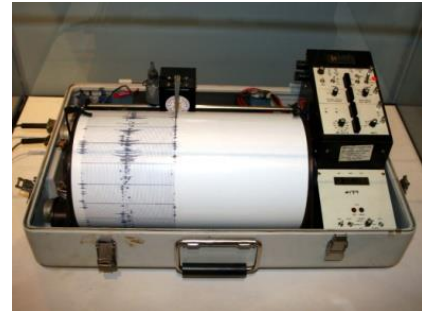
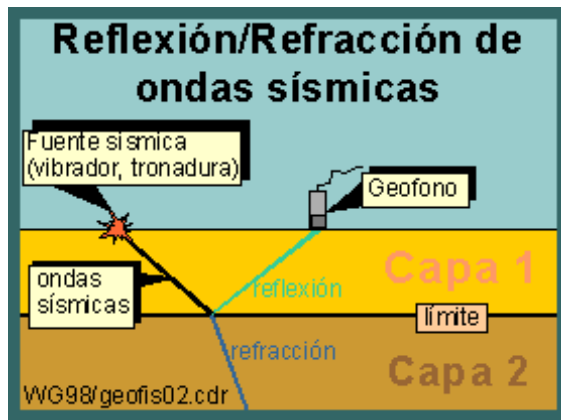


Fuente: ROGERS, J.W. & ADAMS, A.S. (1969): Fundamentos de la geología.

La técnica Sísmica se basa en explorar un área generando temblores que producen ondas sónicas causadas por explosiones de dinamitas (sismigel)

enterradas a pocos metros del suelo (normalmente entre 3 y 9 metros), estas ondas viajan al interior de la tierra a través de los estratos terrestres y se reflejan a la superficie donde se detectan por medio de instrumentos súper sensibles (geófonos o sismógrafos) ubicados en la superficie del suelo, encargadas de captar las ondas sonoras y transmitir las a una estación receptora (interconectados entre sí por cables) para procesar e interpretar la información obtenida. La Sísmica mide las propiedades de las rocas para transmitir las ondas acústicas provenientes de un detonante, las cuales viajan más rápido en rocas duras y compactas que en rocas blandas. Es un método de detalle que tiende a determinar la forma estructural de las cuencas sedimentarias. La exploración Sísmica se puede hacer por Refracción, donde fue utilizada por primera vez en 1.923 en EE.UU., donde obtuvo grandes éxitos en la búsqueda de prospecciones salinas y es considerada una de las formas más económicas de hacer reconocimiento a gran escala. Al generarse las ondas por el detonante, la propagación de la onda cambia de dirección cuando hay un cambio de propiedad física en la masa de la roca que recorre y se basa en el hecho de que las ondas viajan más rápidamente en las formaciones duras como calizas o ígneas y viajan más lento en formaciones blandas como areniscas. Esas velocidades y tiempos de llegada permiten determinar la profundidad y el tipo de roca por las cuales las ondas han viajado. La exploración Sísmica de Reflexión, fue usada por primera vez en 1.926 en Texas y hoy en día es usada de manera más constante que la Refracción. Su principio se basa en que las ondas retornan un eco cuando encuentran estratos duros y se atenúan ante estratos porosos, por lo tanto su tiempo de llegada son relativamente más grandes. El tiempo que tarda desde que se detona y se generan las ondas, viajan a través de los estratos, chocan y se reflejan para llegar a la superficie, determina la profundidad del estrato reflector. Finalmente esa información recolectada se representa en una imagen 2D o 3D del subsuelo. La información recolectada en 3D es enorme, reduce la incertidumbre acerca de la posición y geometría de las capas subterráneas pero el único inconveniente, es su alto costo.

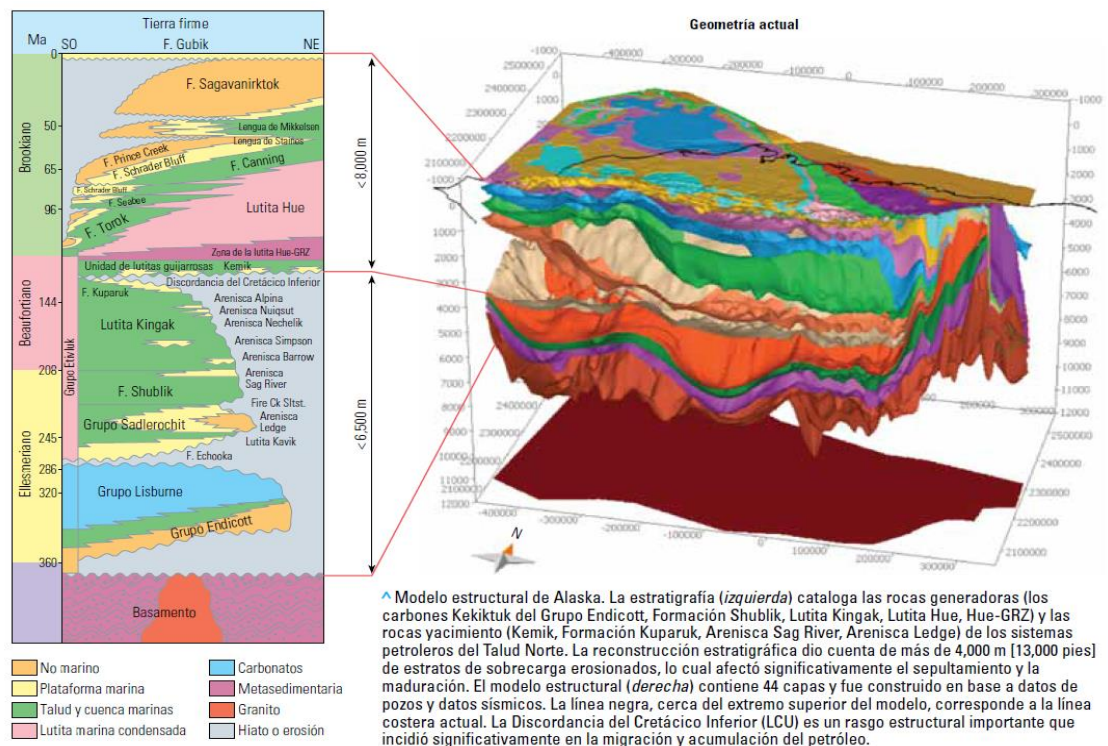
Figura 16. Componentes de las ondas sísmicas en una interface horizontal entre dos distintos medios litológicos



Sismógrafo

Fuente: Knott, C. Reflexión y refracción de ondas elásticas con aplicaciones sismológicas. Philosophical Magazine 48. 1989, p. 64-97

Figura 17. Mapa estratigráfico de sistemas petroleros del Talud Norte.

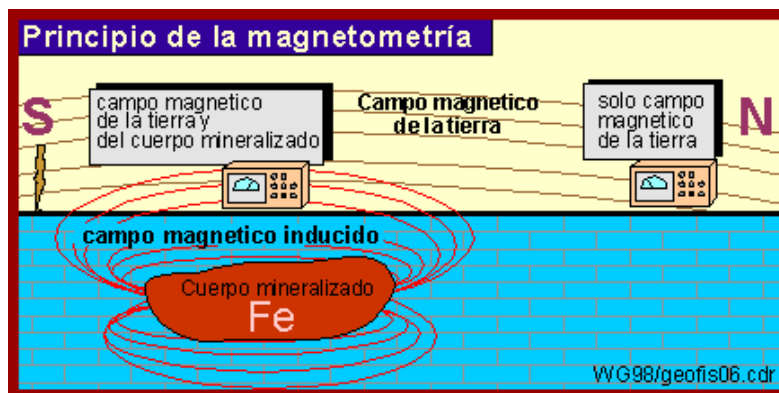


Fuente: "Modelado de cuencas y sistemas petroleros", pagina 26.

La técnica de Magnetometría afecta los yacimientos que contengan magnetita (Fe), estos yacimientos producen su propio campo magnético inducido y el

objetivo es examinar un área empleando un aparato compuesto por un magnetómetro, que detecta la intensidad y dirección de ese campo magnético inducido natural de la tierra y la variación local de ese campo. Estas lecturas registradas toca tomarlas de manera muy cuidadosa para analizar y determinar si existe variación en las lecturas e indicar la posible existencia de un yacimiento. Con esta técnica se puede determinar la disposición interna de los estratos y los tipos de rocas ubicados en el interior de las capas terrestres gracias a las alteraciones magnéticas que estos poseen causadas por las distintas permeabilidades magnéticas de las rocas cristalinas, como se sabe en el caso de las capas ígneas, estas son generalmente más magnéticas que las capas metamórficas y las sedimentarias. A través de los registros arrojados, se pueden identificar tanto los tipos de rocas, como la distribución, profundidad y ubicación de los posibles yacimientos. Esta técnica es la más vieja aplicable a la exploración petrolífera.

Figura 18.comportamiento de la magnetometría en la tierra, afectada por la magnetita (Fe) que contienen los yacimientos



Rastreo magnético

Fuente: SECTOR COPE-ARCHIVO División de Reservorios-Dpto. de Ingeniería, Área Exploracion-Producción, petroleros

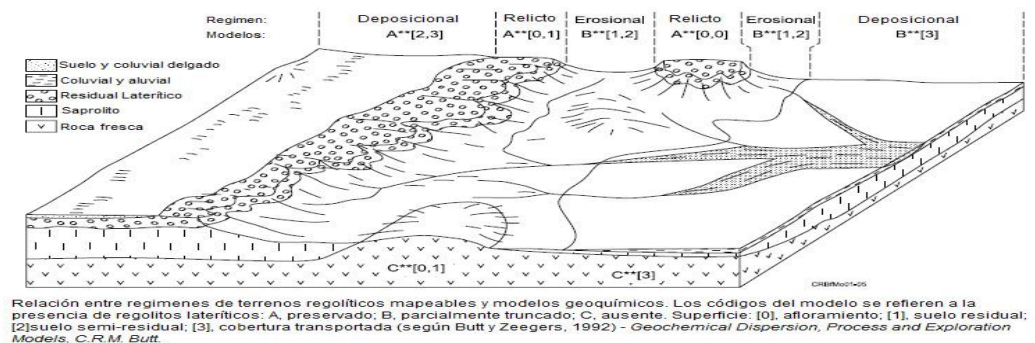
El método Geofísico es el más perseguido y codiciado por las industrias petroleras a lo que se refiere la búsqueda de nuevos yacimientos de hidrocarburos, por lo que los resultados arrojan un mejor modelo y un mayor rango de efectividad.

Al final, para obtener excelentes resultados al hallazgo de estos yacimientos se cuenta tanto con la implementación Geofísica, como la Geológica y finalmente con la Geoquímica.

2.2.3.4.3 Verificación de la acumulación y Método Geoquímico

El método Geoquímico determina la ausencia o existencia de yacimientos petrolíferos o gasíferos, analizando la presencia de gases hidrocarburos como el metano y el etano, que fácilmente pueden ser detectables en concentraciones tan bajas (1.000 ppm) dado que los instrumentos usados en la Geoquímica son altamente sensibles. Se realizan estudios y análisis de estructuras del suelo fracturadas de donde constantemente emanan gases saturados y fluidos de hidrocarburos (petróleo) que surgen solidificándose una vez tiene contacto con la superficie, esas solidificaciones crean cera parafinica natural u ozoquerita dependiendo del crudo que fluye del suelo. El Geoquímico estudia y analiza además, rocas que extraen de perforaciones poco profundas de diferentes sitios con el objetivo de recolectar y comparar información de los estratos de un área determinada con el fin de recrear la estructura del subsuelo. Este método es el más económico en la exploración de hidrocarburos.

Figura 19. Mapa y modelo geoquímico. (Relación de la presencia de elementos químicos en el terreno)



Fuente: www.unalmed.edu.co/.../Geoquimica/exploracion%20geoquimica.htm

Los métodos anteriormente mencionados en conjunto, brindan la mayor información posible para la detección de yacimientos y trampas de petróleo. A

través de los años las industrias petroleras invierten miles de millones de dólares para el desarrollo de nuevos métodos, técnicas, modelos y tecnologías que faciliten cada vez más la localización de nuevas reservas, pero hasta el momento no se ha desarrollado un método directo y único que sin, necesidad de estar a la mano de otro método, permita el hallazgo de una reserva petrolífera.

En la actualidad los métodos exploratorios de las capas terrestres se están expandiendo a varios campos de acción, no solamente a la prospección de petróleo, sino también al hallazgo de nuevas culturas arqueológicas que hasta el momento se desconocen, o simplemente para retroalimentar y expandir los conocimientos que se tengan de las culturas ya conocidas para la protección e investigación de patrimonios. Hoy en día se emplean tecnologías como la Profiler EMP 400, que por medio de campos electromagnéticos ayuda a identificar y evidenciar dadas las distintas repuestas magnéticas de las capas terrestres, la existencia de posibles culturas antepasadas.¹⁷

La exploración para el hallazgo de acuíferos desarrollado en el desierto de Emiratos Árabes, es otro campo que se desarrolla en la actualidad, pues el uso de métodos como la medición de campos electromagnéticos con fuentes conectadas a tierra o fuentes inductivas, son métodos que se desarrollan para identificar a través de las características internas del suelo como la resistividad interna, densidad, temperatura, etc., la existencia de posibles yacimientos de acuíferos en el interior del suelo, proyecto que actualmente se trabaja en la agencia ambiental Abu Dhabi (EAD) en Emiratos Árabes para el almacenamiento y recuperación de acuíferos para los periodos de emergencia y satisfacer los picos de demanda estudiando la posibilidad del almacenamiento de 136 millones de m³ aproximadamente

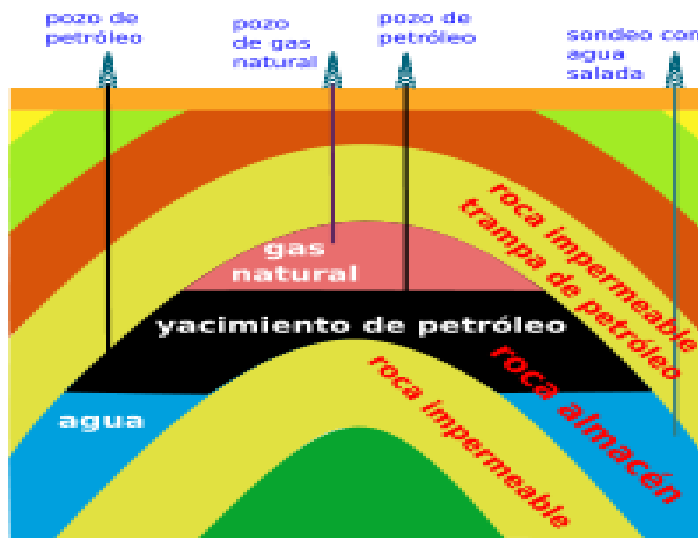
¹⁷“Aplicación de la inducción electromagnética para establecer patrones de actividad antrópica prehispánica”

2.2.4 Trampas de Petróleo

2.2.4.1 Definición de Trampas de Petróleo

Una trampa es una estructura geológica en la cual se hace posible la acumulación y concentración del petróleo, esta lo mantiene atrapado y sin ninguna posibilidad de poder escapar a través de los poros de una roca permeable subterránea. De tal forma que su acumulación da lugar a un yacimiento petrolífero secundario, por tal motivo debido a la función que realiza la roca esta es denominada roca almacén, pues permite el almacenamiento de este hidrocarburo.

Figura 20. Trampa petrolífera



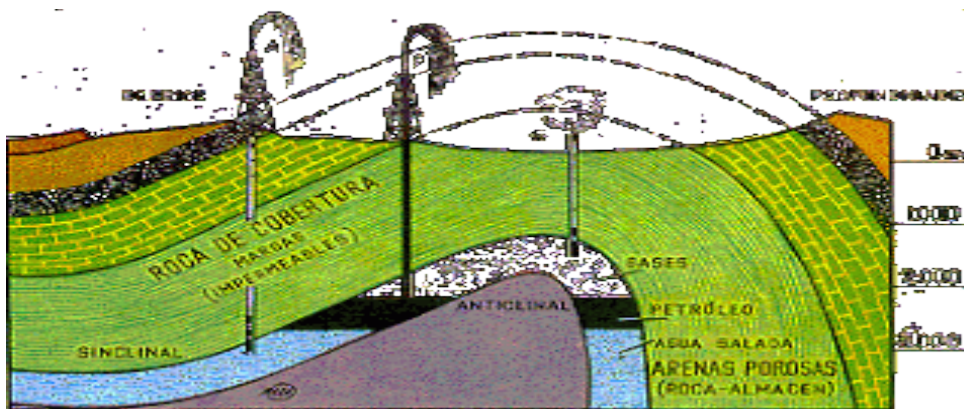
Fuente: *Geología*. Madrid: Editorial Rueda, S.L. p. 448. ISBN 84-7207-009-3

En tal sentido esta roca en la cual se aloja el petróleo, posee una característica fundamental que es permeable y porosa, dentro de estas tenemos las areniscas, aunque también pueden ser los carbonatos, primordialmente debido a sus fracturas y zonas de disolución, en ellas la permeabilidad es medida en unidades llamadas Darcy, sin embargo en su mayoría los yacimientos solamente tienen permeabilidades en rango de milidarcy con promedios entre 50 y 600 milydarcys.

Por su parte una porosidad es el volumen de espacios vacíos que hay en las rocas, esta es medida en porcentajes de volumen total de la roca y con promedios entre el 10 y 20%, las rocas areniscas tienen generalmente porosidad primaria, que está dada por el espacio vacío entre granos que con la diagénesis es disminuida.

En los carbonatos la diagénesis ocurre de manera temprana debido a que su porosidad primaria es muy baja, sin embargo estas poseen porosidad secundaria, que es producida por espacios intercristalinos, fracturas, disolución, etc.

Figura 21. Rocas Reservorio

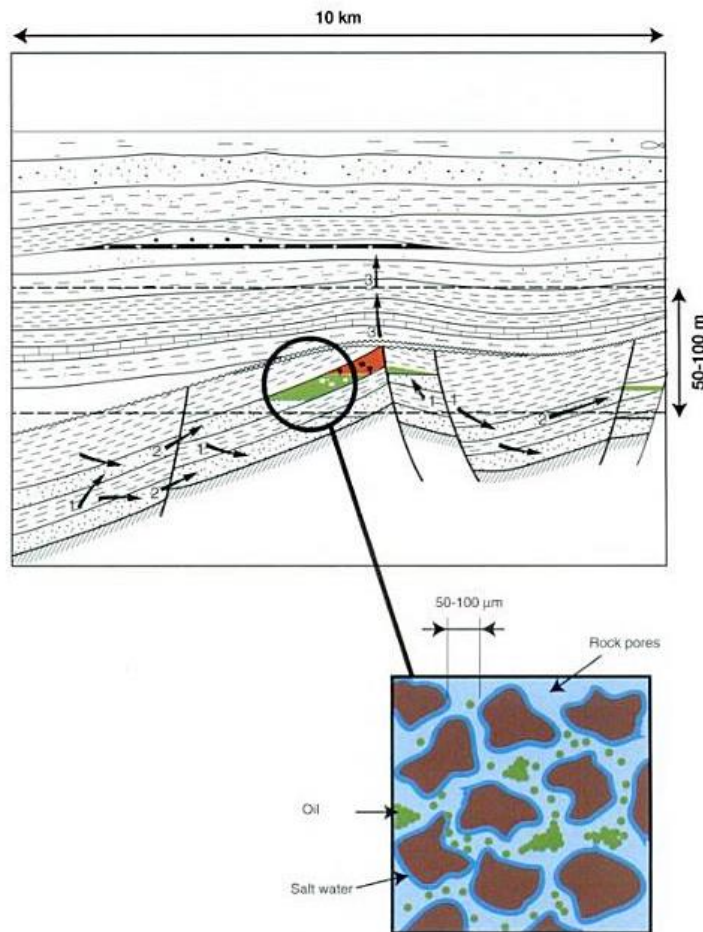


Fuente: http://hidrocarburosindiramejias.blogspot.com/2008_03_01_archive.html

El petróleo flota en las trampas gracias a la composición de diversas sustancias líquidas distintas, y teniendo presente que los hidrocarburos, que son menos densos que el agua. Esto origina un movimiento de migración del petróleo desde el momento en que este se forma, a partir de restos de plancton, hacia la superficie del suelo, viajando en las rocas permeables a través de sus poros. Una vez que sale a la superficie, formando la fuente o manantial de petróleo, va desapareciendo con los años, pues los volátiles escapan a la atmósfera y los demás hidrocarburos van siendo sometidos a la degradación de microorganismos los cuales se alimentan de ellos, pasando luego al resto de la cadena trófica de los ecosistemas.

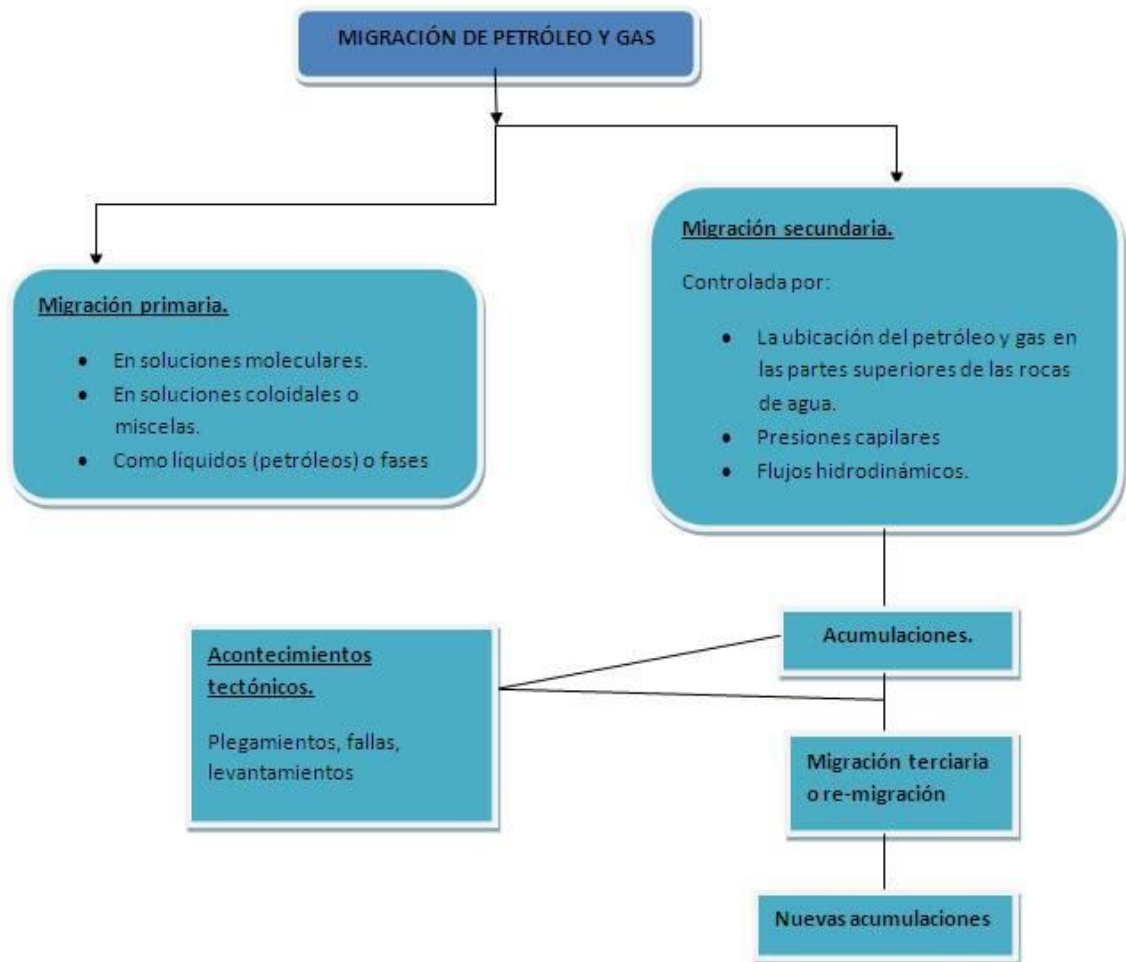
En tal sentido la migración primaria, es decir la expulsión de los hidrocarburos desde la roca madre y su migración secundaria o el movimiento hacia el reservorio son los procesos llevados a cabo dentro de la formación del hidrocarburo en mención.

Figura 22. Sistema de migración sellado por una trampa



Fuente: : <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/mvictoria/materia/GEOLOGIADELPETROLEO/>

Figura 23. Migración de Petróleo y Gas



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos92/migracion-acumulacion-y-aplicacion-del-petroleo/migracion-acumulacion-y-aplicacion-del-petroleo.shtml>

2.2.4.2 Tipos de Trampa de Petróleo

Los geólogos han clasificado las trampas en dos tipos: estructurales y estratigráficas. Una acumulación de petróleo puede estar causada por un solo tipo de trampa o mixtas.

2.2.4.2.1 Trampas Estructurales

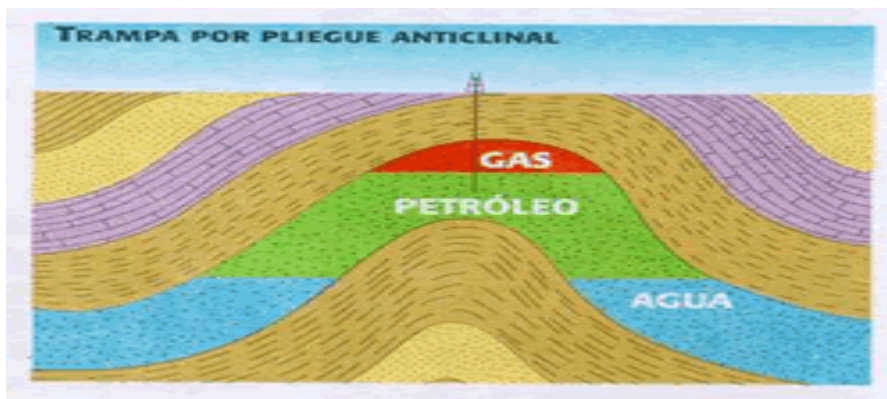
Son aquellas por procesos orogénicos, es decir que estas son originadas por estructuras geológicas las cuales deforman el terreno y determinan la retención y

captura de los hidrocarburos. Este tipo de trampas estructurales son bastante abundantes y fáciles de localizar por métodos geofísicos, en el subsuelo.

Entre estas se encuentran las anticlinales y de fallas.

Trampas Anticlinales: Estas han sido formadas por efecto de compresión, comúnmente asociadas a bordes continentales. Pueden tener múltiples zonas de producción y formar campos gigantes. Dichos plegamientos pueden ser de muchos tipos, pero normalmente están asociados a fallamiento inverso. Este tipo de trampas son muy bien observados en la sísmica y su extensión puede ser desde metros hasta algunos kilómetros.

Figura 24.Trampa anticlinal



Fuente: <http://hidrocarburosindiramejias.blogspot.com/html>

Estas trampas se subdividen en:

Anticlinal Cerrado .En esta el petróleo y el gas quedan atrapados debajo del cierre superior en la parte alta de tales pliegues, ya que alcanza ese punto emigrando hacia arriba por uno de los dos costados, debido a su flotabilidad.

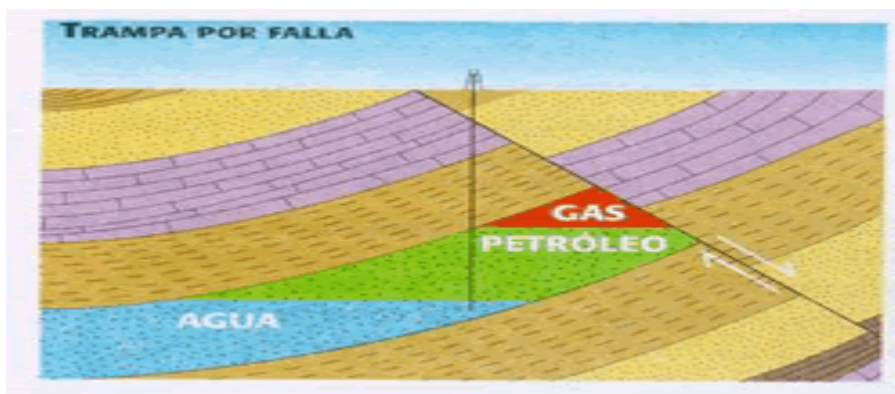
Anticlinal Buzante. Está colocado en el costado monoclinal, con su eje normal al rumbo regional; los cuales son de vital importancia en las trampas por fallas. Esta estructura obstruye por tres costados; el cuarto puede estar cerrado por una falla

de acuerdo al rumbo, o al tipo de barrera de permeabilidad. Usualmente los anticlinales de gran tamaño no poseen petróleo en toda su longitud.

Los anticlinales se descubren mediante estudios geológicos de superficie en el cual existen afloramientos. A través de la perforación de pozos, por métodos geofísicos.

Trampas por Fallas: Este tipo de estructuras son muy importantes en la acumulación de hidrocarburos, estas por lo general sellan los yacimientos. Estas tienen diferentes funciones en la acumulación de petróleo, como por ejemplo una fosa tectónica puede generar una unidad sedimentaria potente para la acumulación de este , por el contrario un aérea donde la sección normal es bastante delgada, como las fallas de empuje pueden originar anticlinales en el manto de corrimiento, de igual forma estas pueden sellar algunas posible trampas en el bloque inferior, es también necesario tener presente que en ciertas áreas los planos de las fallas operan como canales de emigración vertical del petróleo y agua.

Figura 25.Trampa por falla



Fuente: <http://hidrocarburosindiramejias.blogspot.com/html>

Para que se forme una trampa en una falla deben existir algunas condiciones como los son:

- La capa almacén cortada por la falla debe estar cerrada por el desplazamiento de la falla esta debe oponerla a través del plano de la falla con una roca impermeable.
- La zona de la falla debe ser impermeable en las zonas cercanas de la roca almacén.
- La falla debe cortar un anticlinal buzante para que el agua lateral encierre en un semicírculo la acumulación de los hidrocarburos desde un punto de la falla a otro punto de la misma falla, es decir que la trampa debe estar cerrada lateralmente por fallas perpendiculares o bien por el desvanecimiento de la permeabilidad.

Para efectos de buscar trampas en fallas es bastante difícil, pues son muchos los factores que intervienen como por ejemplo: el rumbo, buzamiento, la estructura de las capas sedimentarias y la posición de la falla, sumado a esto se debe tener claro que la falla puede cambiar su buzamiento con la profundidad.

En la práctica no se encuentran trampas anticlinales totalmente escasas de fallas, sino que lo más normal es que una región plegada esta combinada, estas fallas pueden ser: Transversales, oblicuas y longitudinales, tiende a fraccionar los anticlinales, complicando tanto la forma del yacimiento como su interpretación y explotación.

2.2.4.2.2 Trampas Estratigráficas

Estas se forman por cambios laterales de rocas sedimentarias y cambios verticales en las características litológicas de la roca. En estas los procesos orogénicos están ausentes, aquí el yacimiento es formado por cambios litológicos en las formaciones-almacén, de manera independiente de las posibles estructuras producidas por procesos orogénicos. En este tipo de trampas los hidrocarburos

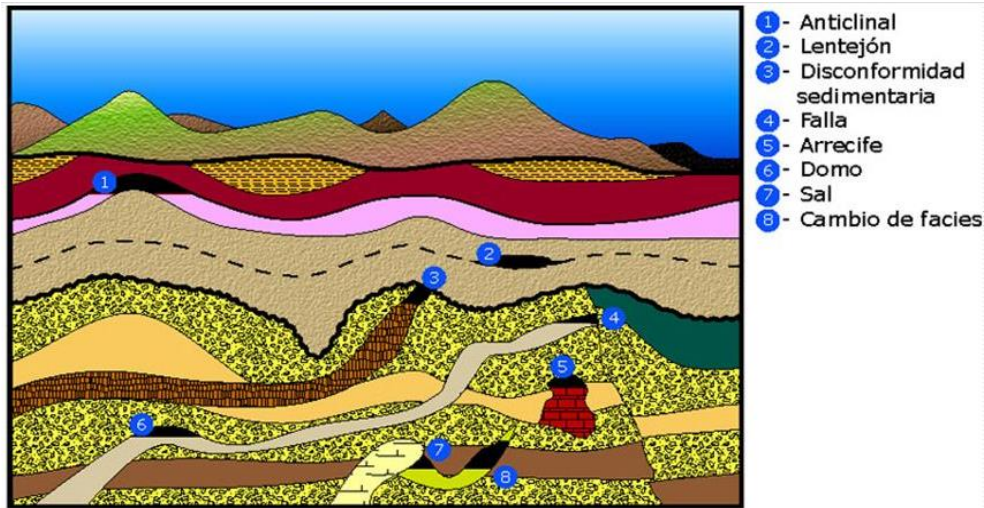
fluyen hacia la parte superior de la roca almacén. Dentro de estas se encuentran las trampas que no tienen estructuras claramente definidas, tales como las que se encuentran en zonas de plegamiento monoclinal o arrecifes, trampas secundarias. Es de anotar que este tipo de trampas son más difíciles de encontrar en el sismograma, pues los procesos que las originan son de carácter diagenético.

Existen varios tipos de trampas estratigráficas entre las que se pueden citar:

Trampas en lentejones arenosos: Este tipo de trampas se forman en masa lenticulares un poco extensas y complejas, de areniscas, que pasan contiguamente a arcillas u otro tipo de rocas impermeables. Estas actúan igual a una esponja, pues a causa de tener en su interior menos presión que las arcillas circundantes, atraen a los hidrocarburos, los cuales se acumulan allí en bastante cantidad. El origen de este tipo de trampas se da en donde predomine la sedimentación detrítica

El origen de estos lentejones puede ser muy variado, habiéndose formado donde predomine la sedimentación detrítica es decir aquella que se da como consecuencia de la pérdida de energía del medio de transporte, que hace que este se interrumpa, con lo cual las partículas físicas que son arrastradas tienden a depositarse en valles fluviales y canales costeros, barras arenosa de playa, formaciones deltaicas, depósitos de talud continental y turbiditas formada a gran profundidad.

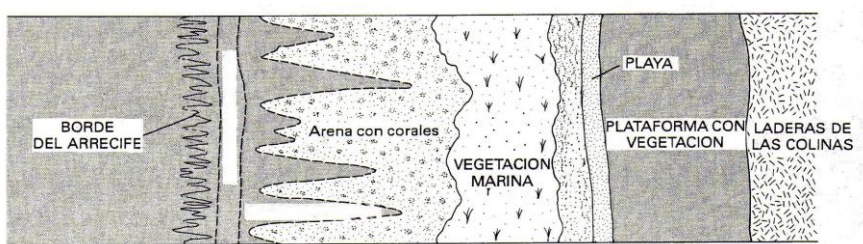
Figura 26.Trampa en lentejones arenosos



Fuente: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/petroleo/yacimientospetro>

Trampas en arrecifes o calizas biohermicas: En estas trampas bajo ciertas circunstancias, algunos organismos coloniales pueden dar lugar a una formación biohermal¹⁸. Esta formación, compuesta por calizas construida por los organismos, posee una extensión lateral limitada a la zona de vida de las colonias, cambiando hacia las facies de laguna en dirección al continente. Por el hecho de que están conformadas por los esqueletos, presentan numerosos huecos y por lo tanto porosidad elevada, por tal razón si están recubiertas por zonas impermeables pueden conformar excelentes almacenes.

Figura 27.Trampa tipo arrecife



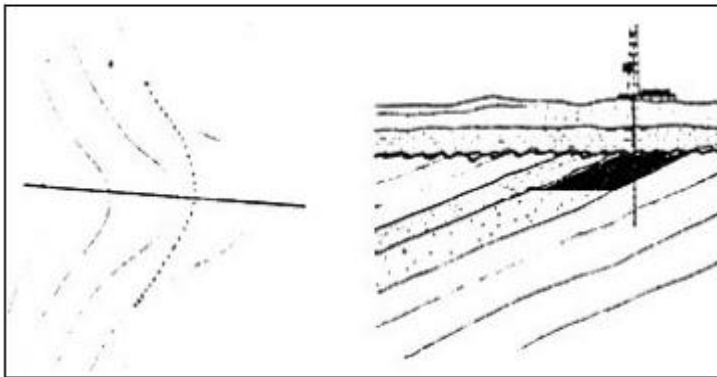
Fuente: Charles Darwin; La estructura y distribución de los arrecifes de coral. CSIC (Madrid).

¹⁸ Son depósitos como montículo o lentes delgados de calizas biológicas formados por organismos que crecieron allí. Tienden a formar campos pequeños y aislados

En este caso el yacimiento se encuentra ubicado en el interior del arrecife, de características fuertes, que cambia lateralmente hacia las facies lagunas, y hacia las facies marinas francas, derecha e izquierda respectivamente. En estas el petróleo puede estar acumulado en las zonas porosas, sin embargo es difícilmente previsible de igual manera, las facies laterales, pueden ser también productoras, si presentan las porosidades adecuadas.

Trampas en discordancias: Estas trampas se encuentran en una superficie de erosión que cubre los estratos inclinados, en este tipo la roca reservorio está ubicada debajo y la roca sello encima; de tal forma que en el momento en que los niveles almacén, erosionados quedan sellados por tales formaciones impermeables discordantes, la trampa es encontrada debajo de la superficie de discordancia o superficie de erosión.

Figura 28.Trampa en Discordancias

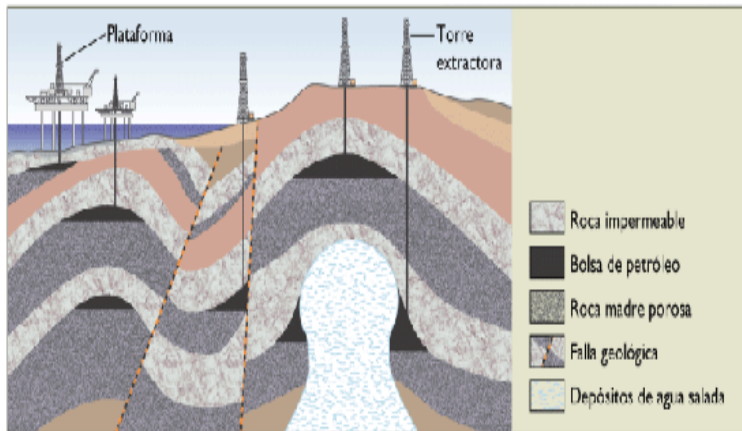


Fuente: <http://es.slideshare.net/shekespeare/trampas>

Trampas asociadas a erupciones volcánicas: En ciertos casos de erupciones cuando atraviesan una cadena de estratos, estas originan trampas estratigráficas, y pueden darse de dos clases; unas al atravesar la intrusión volcánica las capas porosas las sellan de tal manera que se forma una barrera de permeabilidad, y la otra cuando se produce porque los bordes u orillas de la intrusión pueden

manifestarse alterados, en la cual se presenta una porosidad secundaria en la que se forman pequeños yacimientos, esta fue una de las razones por la cual tomó forma la teoría inorgánica creyendo que la roca eruptiva había provocado la formación del petróleo.

Figura 29. Trampa asociada a erupción volcánica

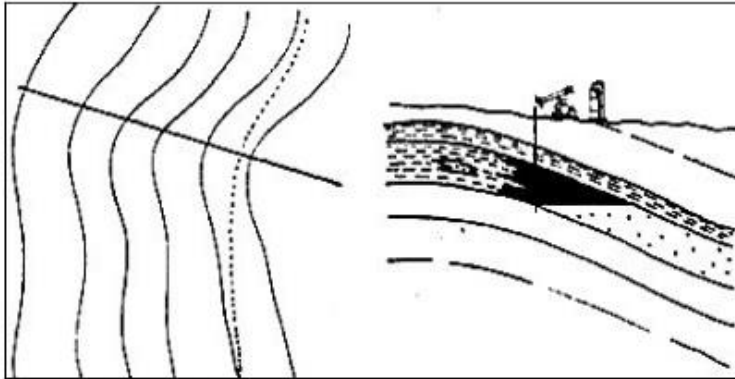


Fuente: www.energiaslibres.org

Para la Búsqueda de trampas estratigráficas es necesario tener claridad en que estas no dan señales indicadoras de su existencia en la superficie. Por tal razón, la única técnica para descubrirla es a partir del empleo de la geología del subsuelo la cual en unión con la geología de la superficie brindan datos sobre la paleogeología y paleogeografía de la región.

Trampas Mixtas: Estas son originadas por la acción tanto de fenómenos tectónicos como sedimentarios, sin embargo en estos yacimientos se pueden circunscribir algunas trampas que se han tomado como estratigráficas, cuando sus cambios litológicos se han efectuado por fenómenos tectónicos, como por ejemplo las asociadas a los domos y diapiros de sal.

Figura 30.Trampa mixta

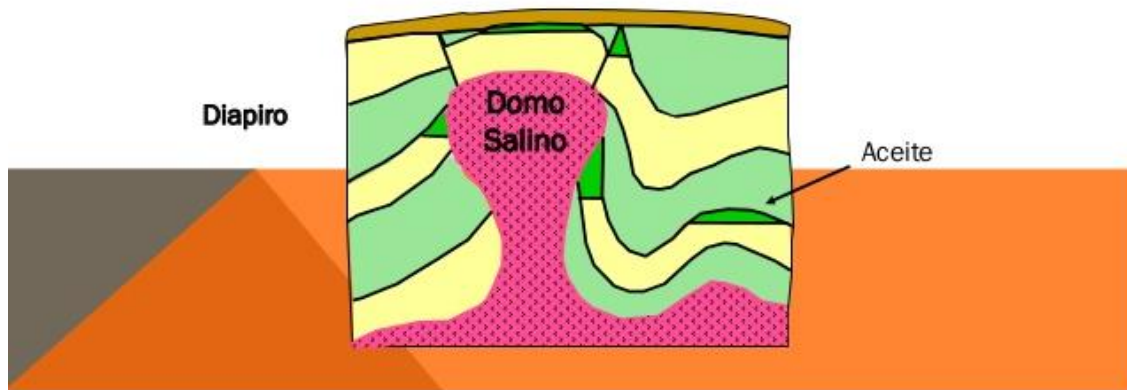


Fuente: <http://es.slideshare.net/Pr1nc3zs/el-mundo-del-petroleo>

Estas trampas se producen a raíz de la ascensión de una masa de sal, causada por las diferencias de densidad entre esta roca y los materiales vecinos. Por su parte la formación del domo salino o diapiro, trae consigo unas deformaciones que se manifiestan como fallas, anticlinales o pliegues sobre los estratos circundantes, o pinzados; además su frecuente movimiento origina anomalías sedimentarias en la zona como son: Lentejones arenosos ubicados en el techo del domo, acuñamiento de estratos y cambios relevantes y violentos de facies. Todas estas estructuras son propias para formar trampas en las que se acumule petróleo, puesto que la sal a partir de los 600 a mil metros de profundidad la sal ha perdido su densidad y por tal razón tiende a desaparecer.

Trampa Petrolífera Mixta en un Diapiro Salino: La elevación de la sal para formar el diapiro, origina la deformación de sedimentos en forma anticlinal subiéndolos localmente.

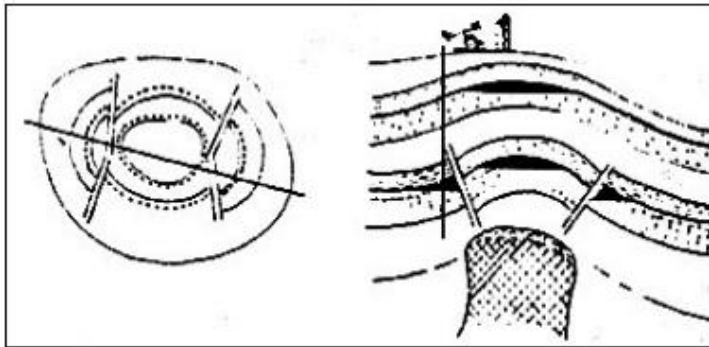
Figura 31.Trampa diapiro salino



Fuente: <http://es.slideshare.net/abelrodas/tipos-de-trampas-de-salida?next>

Domos de Sal Suprayaciendo Domos y Fallas: El levantamiento de un domo salino, logra levantar la cubierta sedimentaria que lo recubre formando trampas, así mismo está cubierta se puede cortar por fallas normales y así se formarían trampas fallas, las cuales pueden separar las rocas almacén en varios yacimientos.

Figura 32.Domos de sal suprayaciendo domos y fallas

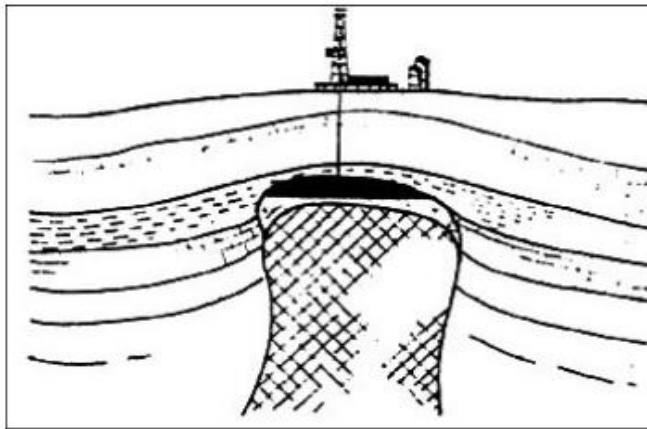


Fuente: <http://es.slideshare.net/shekespeare/trampas>

Domos de Sal- Roca Techo: La sal es inicialmente alta ya que es una sal de roca o sea un mineral sedimentario, el cual se puede formar por la evaporación de agua salada, en depósitos sedimentarios y domos salinos. Está asociada con silvita,

carnalita y otros minerales. Sin embargo se disuelve a medida que el domo se va levantando dejando residuos insolubles, formándose así una roca de techo de varios cientos de pies de espesor, dichas fracturas o cavidades por la disolución convierte a la roca de techo una roca reservorio.

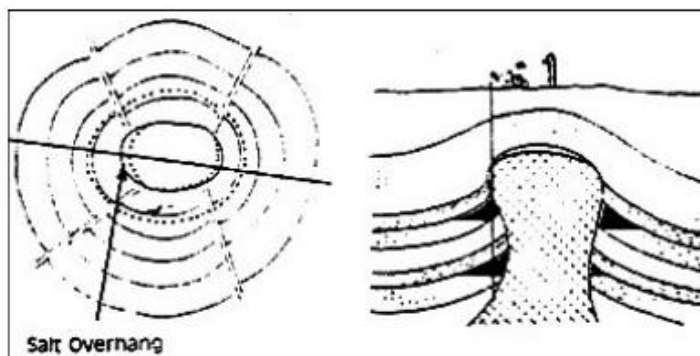
Figura 33.Domos de sal-roca techo



Fuente: <http://es.slideshare.net/shekespeare/trampas>

Domos de Sal-Trampas en Flanco: A lo largo de los flancos o partes de un pliegue que se encuentra entre una charnela ósea la línea que une los puntos de máxima o mínima altura en cada capa, de los domos salinos, se forman trampas en las rocas reservorios cortadas por la inyección del domo.

Figura 34.Domos de sal .trampas en flanco



Fuente: <http://es.slideshare.net/shekespeare/trampas>

El descubrimiento o la búsqueda de trampas mixtas, es fácil por medio de la geofísica, pero en el caso de la búsqueda de las trampas en los flancos es necesaria la utilización de un alto tipo de geología tridimensional, ya que los yacimientos ocupan una posición con relación al núcleo de sal como por ejemplo en el sombrero, que está limitado a la zona de calizas, en las rocas sedimentarias y en las rocas situadas en la columna de la sal.

2.2.4.3 Elementos de las Trampas de Petróleo

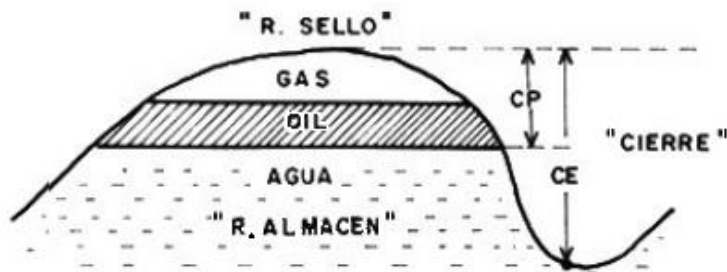
Una trampa de petróleo presenta 3 elementos que son:

Cresta: El cual es el punto de su estructura más alto también conocido como sello.

Punto Inferior: Es conocido como el punto de derrame o cierre.

Cap.: Este es el contacto agua-petróleo. Llamado también almacén.

Figura 35. Elementos de una trampa de petróleo



Fuente: <http://es.slideshare.net/shekespeare/trampas>

En estas los diferentes fluidos se encuentran ubicados en el yacimiento, de acuerdo a sus densidades relativas. Sobre el petróleo se ubica el gas (hidrocarburos gaseosos generados durante la formación del petróleo) y debajo de él agua salada, que en cierta parte es agua fósil atrapada en los sedimentos desde que se da la sedimentación. No obstante al inicio estuvo formada por aguas del mar, su composición ha ido cambiando con el pasar del tiempo, por los apartes

de agua dulce que proceden de las aguas de lluvia y por la disolución de las diferentes sales que se encuentran en los sedimentos. Como resultado este tipo de agua de yacimiento presenta una composición muy distinta a la del agua de mar.

La unión o contacto entre el agua y petróleo es bastante claro, hallándose una zona de transición muy reducida, contrario a lo ocurrido en el contacto sobre el gas y petróleo el cual no es tan claro, ganando una zona de transición con un espesor mayor; en esta zona el gas se encuentra disuelto en la zona impregnada de petróleo, causando como efecto el de la disminución de la viscosidad, logrando así una mejor movilización.

2.2.4.4 Condiciones para la Existencia de una trampa

Para que se dé la formación de una trampa debe existir:

Roca Almacén. También conocida como reservorio, se caracteriza por ser permeable y porosa, en ella se acumulan los hidrocarburos, las más conocidas son las calizas de arrecifes y areniscas

Roca Sello: Este tipo de rocas presentan como característica una permeabilidad baja, las cuales impiden el escape de petróleo y los gases, por lo general son ricas en arcilla. A este grupo pertenecen las rocas calizas poco permeables, las volcánicas, entre otras.

Cierre: Este se considera la distancia en forma vertical que existe entre el punto más alto de la trampa y un determinado nivel por debajo del que por lo general migra el petróleo. Existen dos tipos de cierres unos llamados estructurales y otros conocidos como prácticos.

En este orden una trampa es formada cuando la presión capilar de desplazamiento excede la presión de flotabilidad del petróleo, por tal razón las trampas poseen mayor cantidad de petróleo que la de gas.¹⁹

2.2.5 Efectos de la Explotación del Petróleo Sobre el Medio Ambiente

2.2.5.1 Impactos en el Medio Ambiente

Nuestro territorio colombiano cuenta con valiosas reservas petroleras que han sido explotadas originando graves impactos en el medio ambiente.

Dentro de la actividad petrolera se dan varias etapas y cada una de estas ocasiona varios impactos ambientales de gran importancia a la biodiversidad y al medio ambiente en general y en algunos casos tales impactos son irreversibles, sin embargo en el presente trabajo se tratará únicamente los impactos generados a partir de la exploración del petróleo.

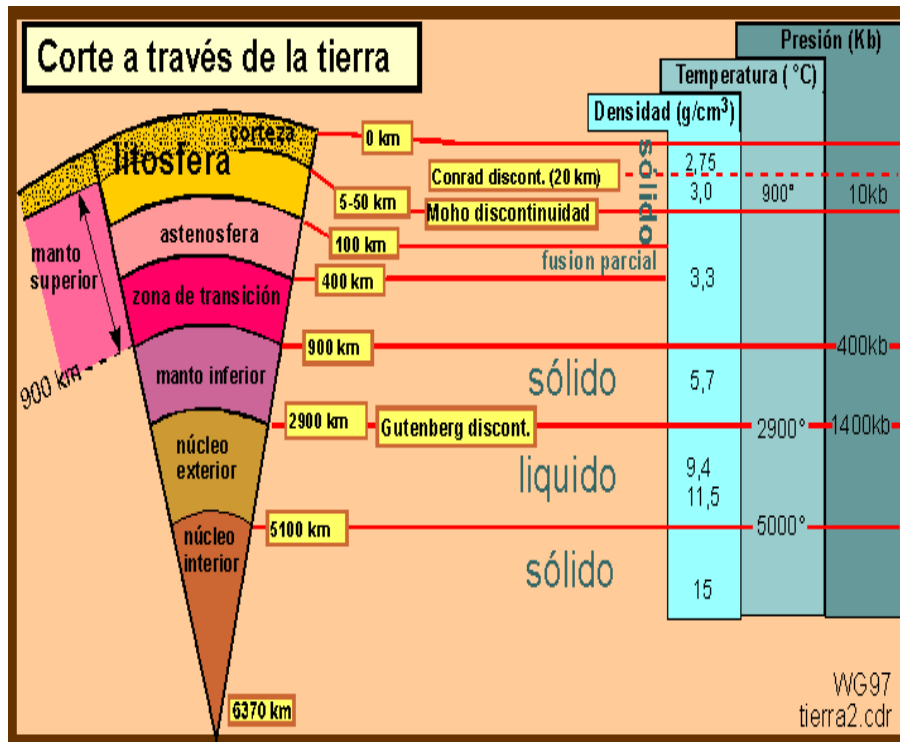
2.3 COMPONENTES FISICOS Y ELECTROMAGNETICOS DE LAS CAPAS TERRESTRES

2.3.1 Capas de la Tierra

La tierra está formada por una corteza, el manto y el núcleo los que se describen a continuación.

¹⁹ Kenney, J., Kutcherov, V., Bendeliani, N. and Alekseev, V. (2002). «The evolution of multicomponent systems at high pressures: VI. The thermodynamic stability of the hydrogen–carbon system: The genesis of hydrocarbons and the origin of petroleum». Proceedings of the National Academy of Sciences 99: 10976–10981. doi:10.1073/pnas.172376899. Consultado el 2006-10-04.

Figura 36. Capas de la tierra



Fuente: <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/htm>

2.3.1.1 La Corteza

Esta es una capa más externa y heterogénea en la cual se pueden identificar tres estructuras.

2.3.1.1.1 Corteza Continental

Esta está formada por una capa de rocas. Sus materiales se conformaron desde 4.000 años atrás, y es mucho más antigua que la corteza oceánica. Esta es una capa rígida y fría de la tierra. Su grosor está cercano a los 40 kilómetros, aunque en algunas zonas geológicas puede llegar a los 70 kilómetros.

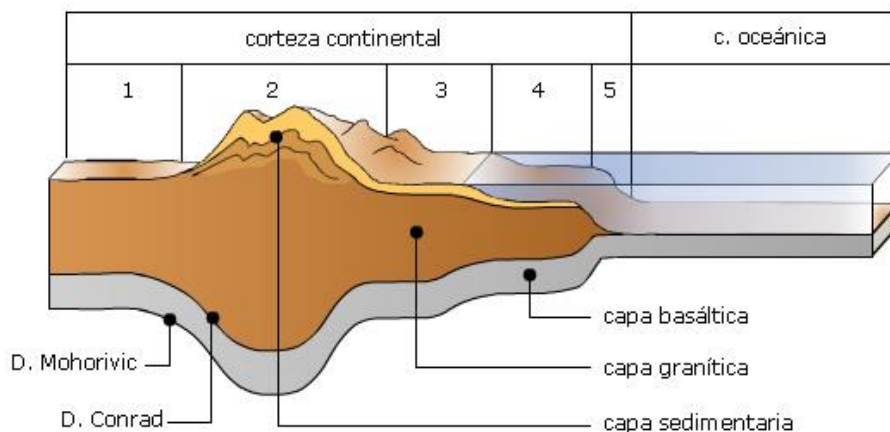
La corteza continental está formada por dos zonas la superior y la inferior, esta corteza sirvió de origen a los continentes, y está formada por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Sin embargo la corteza inferior está compuesta principalmente por granito de origen plutónico.

En el momento de llevar a cabo investigaciones de la corteza continental es necesario efectuar perforaciones por medio de sondajes que en ocasiones llegan hasta los 12 kilómetros. De igual manera se emplean métodos geofísicos como la sismología o la gravimetría; y para analizar la corteza continental se utiliza la volcanología, la petrografía y la geoquímica.

La corteza continental debido a los movimientos tectónicos, el vulcanismo, la sedimentación y la erosión permiten que las zonas del mar que se encuentran a baja profundidad se renueven con frecuencia.

Figura 37. Corteza

(1) Escudo (2) Orógeno (3) plataforma (4) Plataforma continental (5) Talud continental



Fuente: <http://www.artinaid.com/2013/04/composicion-de-la-corteza-terrestre/>

2.3.1.1.2 Cratones

Los cratones son zonas rígidas y bastante extensas, se caracterizan porque no presentan relieves. Estos cratones por lo general se presentan afectados y fracturados debido a los movimientos epirogenicos que son movimientos en la vertical que se efectúan de manera ascendente o descendente.

En los cratones los diferentes geólogos han identificado áreas de escudos y de plataformas, los escudos se caracterizan por ser zonas elevadas que no poseen sedimentos recientes, en este surge el zócalo cratón el cual se expone con

frecuencia a erosiones continuas, por su parte las áreas de plataforma son zonas cratónicas que no poseen mucha profundidad y se ha rellenado con rocas sedimentarias.

Las rocas que conforman los cratones son por lo general arcaicas granitizadas o metamorizadas que tienen una antigüedad de más de 570 m.a., en si los cratones no han podido ser recubiertos por el mar durante los ciclos transgresivos, ya que han sido afectadas por movimientos tectónicos verticales.

2.3.1.1.3 Orógenos

Los orógenos o cordilleras se crean cuando una placa tectónica con corteza continental es "arrugada" y empujada hacia arriba. Todo esto implica una gran cantidad de procesos geológicos que en conjunto se llaman orogénesis²⁰.

El hecho de que las cordilleras estén asociadas a bordes de placas las cadenas de montañas presenta formas alargadas, y se pueden diferenciar dos tipos de orógenos.

Orógenos de borde continental. Se conocen también como de tipo andino estos se originan en zonas de subducción océano-continente. Los sedimentos que se originan en el continente y que permanecen almacenados en la fosa son se pliegan y fracturan causando una compresión, estos se elevan pausadamente, este tipo de orógenos también se ven ayudados por las diferentes e intensas actividades magmática por lo cual se conocen como cadenas térmicas.

Orógenos de Colisión: También se conocen como orógenos de tipo alpino o intercontinental ya que es dada u originada por el choque de dos márgenes continentales un ejemplo de este tenemos el Himalaya que fue producido por el acercamiento de la placa buzante que fue la India y por una placa cabalgante que fue en este caso Asia.

²⁰ Tony Waltham (2009). Foundations of Engineering Geology (en inglés) (3ra edición). Taylor & Francis. p. 20. ISBN 0-415-46959-7

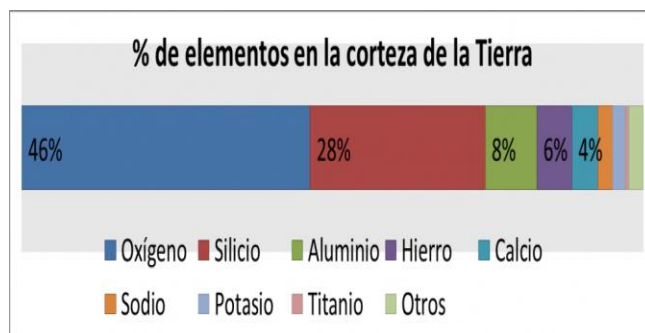
2.3.2 Composición de la Corteza

La corteza está localizada en la parte superior de la litósfera con un grosor entre 3 a 100 kilómetros. Su densidad en la corteza superior oscila entre los 2.69 ton/m³ y los 2.74 ton/m³ y en la corteza inferior entre 3 y 3.2 ton/m³.

La corteza terrestre también conocida como litosfera está conformada por diferentes tipos de rocas entre las cuales se encuentran: sedimentarias, ígneas y metamórficas, en este abundan los minerales silicatados del tipo del cuarzo, los feldespatos, micas. También está formada por un material similar a la de la andesita que es una roca volcánica ígnea extrusiva que posee un 60% de dióxidos de silicio SiO₂ y minerales accesorios; de la misma manera ésta es rica en elementos incompatibles con el océano volcánico comparado con el manto.

Dentro de los elementos de la corteza encontramos oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio, titanio, entre otros, de la misma forma se tiene que la superficie de la corteza tiene una composición de óxidos de silicio, de hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, y titanio.

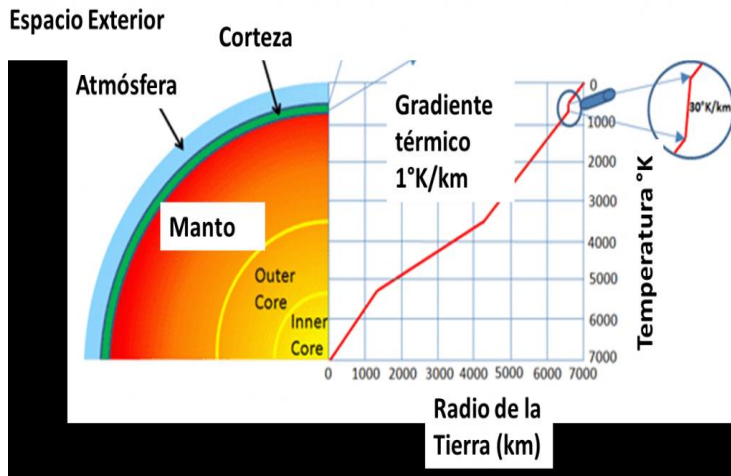
Figura 38.Elementos de la corteza



Fuente: Fuente: <http://www.artinaid.com/2013/04/composicion-de-la-corteza-terrestre>

En cuanto a la temperatura de la corteza se estima que esta aumenta en proporción a la profundidad llegando incluso de los 200°C hasta los 400°C en el límite con el manto superior. Esta aumenta hasta 30°C por cada kilómetro de profundidad en la parte superior de la corteza.

Figura 39. Gradiente geotérmico y la estructura de la tierra



Fuente: <http://www.artinaid.com/2013/04/composicion-de-la-corteza-terrestre>

2.3.2.1 El Manto

El manto también llamado mesosfera, es una capa de 2.900 km de grosor, está localizado por debajo de la corteza es una capa de rocas de gran potencia, constituida por rocas más densas, donde predominan los silicatos, por tanto la densidad del Manto aumenta con la profundidad, pasando de 3,5 g/cm³ en la superficie a 5,5 g/cm³ en las proximidades del núcleo

El manto se extiende desde los 35-45 kilómetros hasta los 2.900, es decir que conforman la mitad del radio de la Tierra. Por tanto los geólogos han determinado que este constituye el 83 % del volumen total del planeta y el 67 % de su masa.

El Manto está conformado por silicatos de hierro y magnesio. Teniendo claridad que estos se encuentran más densos en el interior llamado manto interior y menos denso al exterior o manto superior, la composición química del manto está basada en rocas ígneas plutónicas del tipo de las peridotitas.

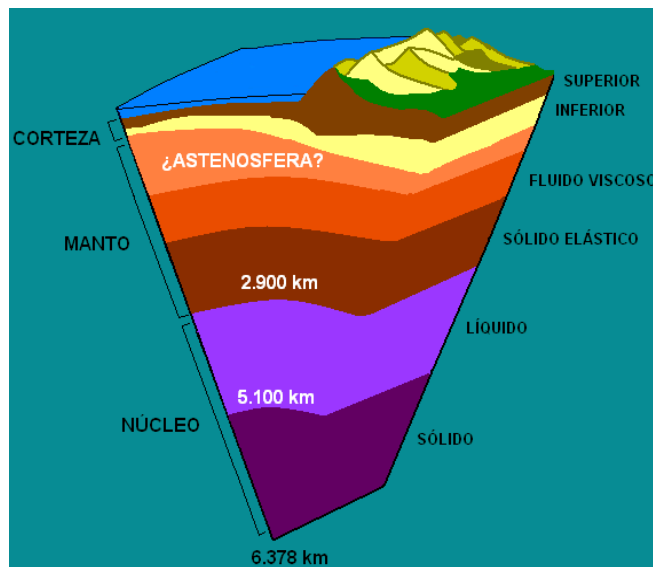
Se presenta en estado sólido excepto una delgada capa que se sitúa entre los 70 y 250 kilómetros que recibe el nombre de Astenosfera. La cual se encuentra debajo de la litosfera que está involucrada en los movimientos de las placas tectónicas y los ajustes isostáticos, esta capa presenta una densidad

relativamente baja y las ondas sísmicas pasan de forma lenta a través de esta capa en comparación con el manto que cubre la litosfera, por tal razón se la ha considerado una zona de baja velocidad.

El manto es una capa muy activa pues se llevan a cabo fenómenos de convección de materiales, ya que los materiales calientes están propensos a ascender desde el núcleo, consiguen alcanzar la superficie y cuando estos materiales se enfrían empiezan a hundirse de nuevo hacia el interior, a esto se le conoce como un ciclo de materia llamado Ciclo de Convección. Este tipo de movimiento de materiales originan el desplazamiento de los continentes y se ve asociado: terremotos, vulcanismo, creación de islas y cordilleras, etc.

Las zonas de subducción, es decir donde se llevan a cabo procesos mediante los cuales la parte de la corteza oceánica, individualizada en una placa litosférica, se sumerge bajo otra placa de carácter continental son áreas de alta sismicidad.

Figura 40.El manto de la corteza terrestre



Fuente: <https://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/manto>

2.3.2.2 El Núcleo

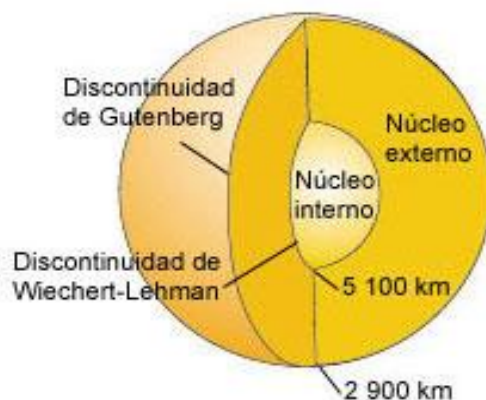
El núcleo también conocido como endosfera, es la capa más interna de la Tierra, está compuesto por un 90% de hierro, y por un 10% de otros elementos como níquel, azufre en una mayor proporción y en menor cantidad con oxígeno y azufre.

El núcleo interno tiene un radio de 1.220 km, posee un calor intenso Su temperatura es realmente altísima pudiendo llegar a los 6700°, incluso es más caliente que la superficie del sol; se cree que eso tiene que ver con el calor que resultó de la colisión de las partículas cuando la tierra se conformó.

El núcleo es el causante de los procesos internos que se dan en la Tierra, algunos se manifiestan en la superficie, como por ejemplo: los terremotos, el vulcanismo o el desplazamiento de los continentes.

Se pueden identificar dos clases de núcleos:

Figura 41. Núcleo interno y externo



Fuente: <http://www.librosvivos.net/smtc>

Núcleo interno: Esta ubicado entre los 5150 y los 6374 km de profundidad. Se extiende desde la discontinuidad de Weichert-Lehman hasta el centro de la Tierra. Aquí se encuentra en estado sólido: se cree que este es el resultado de la solidificación o cristalización de una masa líquida de una gran magnitud y que está

en un proceso de crecimiento, la energía de este núcleo influye notablemente en el manto sobre todos en las corrientes de convección, según los geólogos el núcleo interno presenta un movimiento de rotación.

El núcleo externo: Está situado entre los 2900 y los 5100 km de profundidad, se encuentra en estado líquido y está conformado por hierro, níquel y otros componentes menos densos que los que existen en el núcleo interno. Se localiza entre la discontinuidad de Gutenberg y la discontinuidad de Weichert-Lehman

2.3.3 Métodos Directos para el Estudio del Interior de la Tierra

Dentro de los métodos directos para el estudio del interior de la tierra se pueden mencionar:

Mediante sondeos: Consisten en perforaciones que se taladran en el subsuelo a través de máquinas perforadoras que pueden alcanzar unos 6 km de profundidad. Con diferentes fines como por ejemplo la extracción de petróleo.

Volcanes: Está basada en el análisis de los materiales que expulsan los volcanes ya que estos pueden haberse formado a una cierta profundidad del subsuelo, del orden de decenas de kilómetros. El análisis petrológico de estas rocas puede proporcionar una idea de la composición química de las regiones más profundas en la que se ha formado el magma.

Meteoritos: Este permite de conocer las características del interior de la Tierra a partir de la comparación los meteoritos que caen a la superficie del planeta. Los meteoritos son fragmentos de roca que proceden, en su mayoría, del cinturón de asteroides, muchos de los meteoritos representan la composición original de los materiales a partir de los cuales se formó el sistema solar como los condritas, que conservan una proporción relativamente elevada de elementos ligeros, necesarios para explicar el origen de la vida, otros en cambio han sufrido procesos de cambios que se intuye que son iguales a los de nuestro propio planeta como los ricos en elementos metálicos pesados, especialmente hierro y níquel.

2.3.4 Métodos Indirectos para el Estudio del Interior de la Tierra

Los métodos indirectos se centran en el cálculo y deducciones que se obtienen al realizar un estudio de las propiedades físicas y químicas de la tierra los cuales pueden ser: la masa de la tierra, para la cual se utiliza la ley de la gravitación universal expuesta por Isaac Newton, el volumen de la tierra haciendo uso de la fórmula del volumen de una esfera y la densidad de la tierra la cual cambia dependiendo de su superficie. Para esto se hace uso de métodos como:

2.3.4.1 Métodos Sísmicos

Para este método se hace uso de vibraciones (ondas sísmicas) producidas por los terremotos a causa de la liberación repentina de la energía elástica almacenada en rocas sometidas a tensión.

Este comportamiento de las ondas se registran en las estaciones sismológicas que se encuentran en todo el mundo estas permiten conocer datos sobre el comportamiento de esas ondas durante su trayecto como la velocidad o propagación, el punto de origen, etc.

2.3.4.2 Métodos Gravimétricos

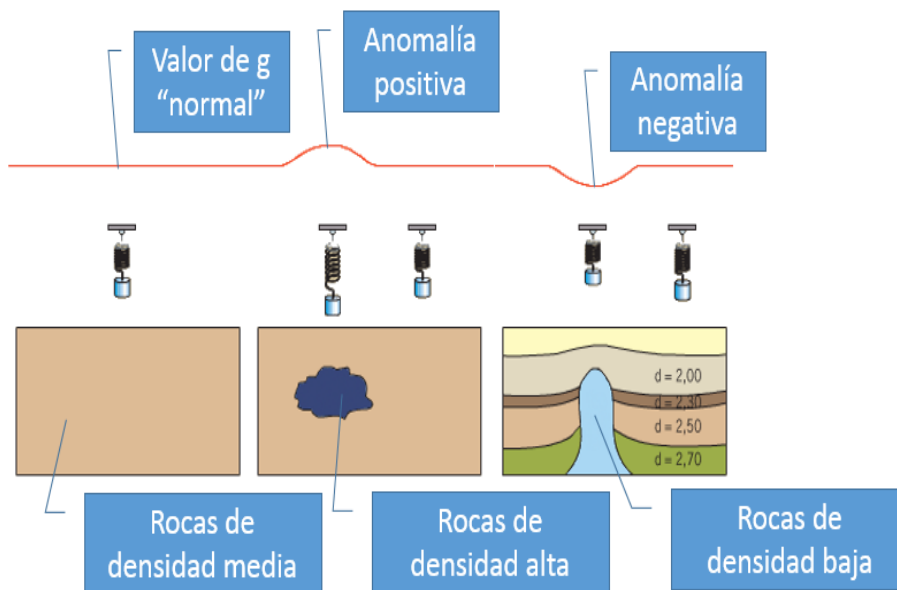
Los métodos gravimétricos se basan en el análisis del campo gravitatorio terrestre y en sus anomalías, teniendo presente que estas variaciones observadas al medir la gravedad en la superficie tienen que ver con la distribución, estructura y la composición de las masas rocosas del interior de la Tierra, es decir que tiene en cuenta que la gravedad no es la misma en todos los puntos de la tierra.

Es necesario tener presente que las anomalías gravimétricas proporcionan una importante información sobre los materiales que se encuentran en el subsuelo de esta manera servirá para localizar diferentes yacimientos cuya densidad sea distinta a la de las rocas que lo rodean.

El estudio gravimétrico ha permitido determinar que la forma de la Tierra responde mejor al modelo denominado de geoide que al elipsoide matemático que se establecía tradicionalmente.

Según este método se puede determinar si existen anomalías gravitatorias o desviaciones del valor de la aceleración gravitatoria teórica de un punto, esta puede ser positiva y negativa; positiva cuando el valor de gravedad medido en ese punto es mayor que el calculado e indican que en esa zona existen, en el interior de la Tierra, materiales de mayor densidad que la media y la anomalía es negativa cuando el valor de gravedad medido en ese punto es menor que el calculado, esto nos indican la presencia de materiales de densidad baja.

Figura 42. Anomalía positiva y negativa



Fuente: métodos-de-estudio-del-interior-de-la tierra.html

Los estudios gravimétricos son importantes en la prospección geológica de minas, a nivel local, mientras que a escala global son importantes para lograr identificar las distribuciones geográficas de rocas de diferente naturaleza, más o menos densas que lo esperado.

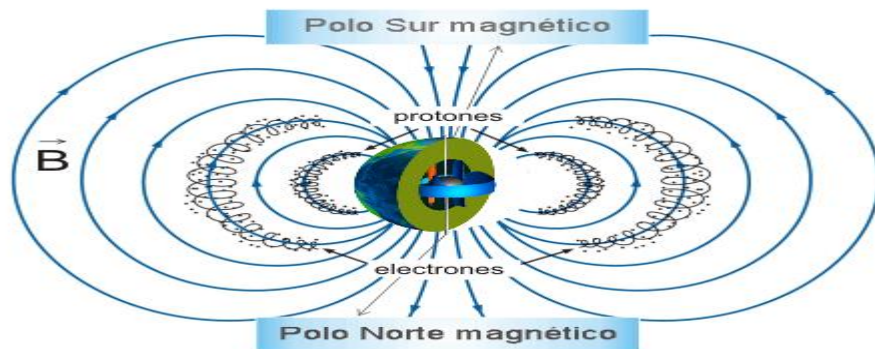
2.3.4.3 Métodos Magnéticos

El campo magnético de la Tierra en su mayor parte es decir aproximadamente un 95%, procede de su interior. Este método se basa en el estudio del campo magnético terrestre, explican la presencia en el interior de la Tierra de un material de naturaleza metálica en dos estados físicos diferentes como el sólido y posiblemente, líquido. De igual manera se ha probado con este tipo de método la existencia de un núcleo interno sólido rodeado de un núcleo externo fluido que hace que esta capa funcione como una dinamo, el cual es el que determina el campo magnético.

Gracias a este estudio se ha logrado comprobar que el campo magnético de la tierra funciona como un imán, que lleva a suponer la existencia de una masa de metal líquido girando alrededor de un núcleo metálico sólido y con dos polos, norte y sur, en el que su posición está próxima a la de los polos geográficos, aunque es el polo sur magnético el que se encuentra en el hemisferio norte, hay registros geológicos que demuestran se han producido inversiones magnéticas en las que los polos magnéticos han cambiado de posición a través de la historia, por desplazamientos de unos 180°. El eje magnético de la Tierra es en cierta forma anormal pues no pasa por el centro del planeta, sino unos kilómetros por encima del mismo, bajo el océano Pacífico.

Debido a las oscilaciones magnéticas de las rocas del fondo oceánico, se logra establecer la posición inconstante de los polos magnéticos de la Tierra, su relación con la posición de los continentes, la apertura de los océanos y su edad de igual manera demostrar el desplazamiento de los continentes, la localización de yacimientos minerales etc.

Figura 43.Campo magnético terrestre



Fuente: metodos-de-estudio-del-interior-de-la.html

2.3.4.4 Métodos Eléctricos

Este método busca analizar los cambios de conductividad eléctrica que presentan las rocas, sin embargo como la conductividad eléctrica de estas es baja se acostumbra a medir la magnitud inversa, la resistividad.

La medida de cada uno de los valores que presentan los materiales en la tierra frente a las propiedades eléctricas ayudan a intuir la idea de la estructura, de la composición o de la profundidad a la que se encuentran dichos materiales, así como también del lugar donde se encuentran los acuíferos, minas metalíferas, etc.

Este método consiste en la introducción de unos electrodos que sirven para inyectar corriente e introducir otro par de electrodos que estarán conectados a un voltímetro el cual va indicando la diferencia de potencial. Se utiliza este tipo de método para la prospección de aguas subterráneas las cuales abundan donde existen rocas que poseen muy baja conducción²¹. De igual manera cuando se está buscando un yacimiento metálico el cual con otros métodos ya ha sido identificado, con este método se logra la exactitud de su ubicación. Sin embargo este método presenta un inconveniente y es que mientras menor es la resistividad

²¹ Centro de Formación y Adiestramiento de Petróleos de Venezuela y sus Filiales "La Industria Venezolana de los Hidrocarburos: Vol. 2" Editorial CEPET Caracas, Venezuela.1989 pps. 291-299

y mayor la frecuencia, la penetración del campo magnético en el interior será menor, por lo tanto el estudio será más superficial; a este método se le conoce como limitación de la profundidad para la detección de buenos conductores²².

2.3.4.5 Métodos Térmicos

Este método estudia el gradiente térmico, es decir la variación de la temperatura de todos los materiales de la tierra en especial del rocoso, este avanza desde la superficie de la tierra hacia el centro.

En la tierra en su interior existe un calor interno que se desprende en forma de un flujo geotérmico. Al efectuar estudios de este flujo, sus anomalías y sus mecanismos de disipación, es posible determinar las condiciones del interior del planeta y sobre su estructura interna aproximada.

Los estudios con este método han logrado establecer que en la parte superior del núcleo y del manto existe un gran cúmulo de elementos radiactivos que se ubicaron en ese lugar por su densidad y brindan calor al núcleo.

2.3.4.6 Métodos Astronómicos

Este método explica que los meteoritos son pedazos de un planeta muy parecido al de la Tierra, que comenzó su formación en las primeras etapas de la historia del sistema solar, que debido a la densidad de sus materiales se dividió en capas y después se disolvió en fragmentos debido a los encuentros con otros planetas similares.

²² <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PONENTES/TEMA%206%20Geofisica/metodos%20electromagneticos.pdf>

2.3.5 Propiedades Físicas y Electromagnéticas de las Capas de la tierra

2.3.5.1 Peso Específico:

La tierra tiene una densidad o peso específico respectivamente alto. La causa es el depósito de minerales pesados en el núcleo y el manto a causa de la diferenciación. En ese orden los minerales pesados durante y después de la formación de la tierra se movieron hacia abajo, quedando los livianos en la corteza terrestre.

2.3.5.2 Permeabilidad

Esta es la capacidad que tiene una roca de permitir el movimiento de fluidos a través de sus poros interconectados. En ese orden si los poros de la roca no se encuentran interconectados no puede haber permeabilidad.

Hay algunos factores que afectan a la permeabilidad del suelo. En algunos casos, son factores localizados (fisuras y cárcavas), y se dificulta hallar valores de permeabilidad a partir de mediciones reales. El estudio de las capas del interior del suelo proporciona interesantes observaciones como la textura del suelo, la estructura, la consistencia, el color y manchas de color, la disposición de capas, los poros visibles, la capa de arcilla y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre, estas observaciones son la base para decidir si es viable o no las mediciones de la permeabilidad y que sean representativas. Como se sabe, el suelo está conformado por horizontes, y cada uno de ellos posee propiedades físicas y químicas diferentes. Para establecer la permeabilidad total del suelo, se deben estudiar los horizontes por separado.

2.3.5.3 Permeabilidad Magnética

Es la capacidad que posee una roca para atraer y permitir el paso del campo magnético. La permeabilidad magnética es una medida que nos permite analizar la capacidad de almacenamiento de energía magnética de un material, y solo los

materiales de composición ferromagnético²³ tienen esa cualidad. Los demás materiales que no son capaces de conservar esa energía toman un valor (μ) igual a 1 H/m. El valor de esta constante es exclusivo del medio y se denomina constante relativa del medio (μ_r). La constante absoluta se relaciona con el medio vacío, donde toma valor de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. La constante absoluta de un medio es el producto entre la constante absoluta del vacío y la constante relativa del medio, de tal manera que $\mu = \mu_r \times \mu_0$.

2.3.5.4 Permitividad Dieléctrica

Es la capacidad que tiene un medio de polarizarse al darse la presencia de un campo eléctrico. La permitividad dieléctrica debe considerar tres factores como la constante relativa del medio (ϵ_r), la constante relativa del vacío que toma un valor de $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m, y el valor absoluto del medio que viene siendo el producto de las dos constantes anteriores $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$.

2.3.5.5 Coeficiente de Resistividad:

La resistividad, contraria a la conductividad, es considerada como la resistencia eléctrica determinada de cada material para oponerse al paso de una corriente eléctrica. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios metro ($\Omega \cdot m$).

El valor de resistividad determina el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, lo cual determina si es buen o mal conductor. Cuando el valor de resistividad es alto muestra que el material es mal conductor contrario al que da como resultado un valor bajo indicará que es un buen conductor.

Existen algunos factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca, como lo son: La porosidad, la composición química del agua, la cual llena los

²³ Materiales que pueden ser atraídos por un imán. Fenómeno físico en el que se produce un ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido.

espacios porosos de la roca, su salinidad y la conductividad de los granos minerales.

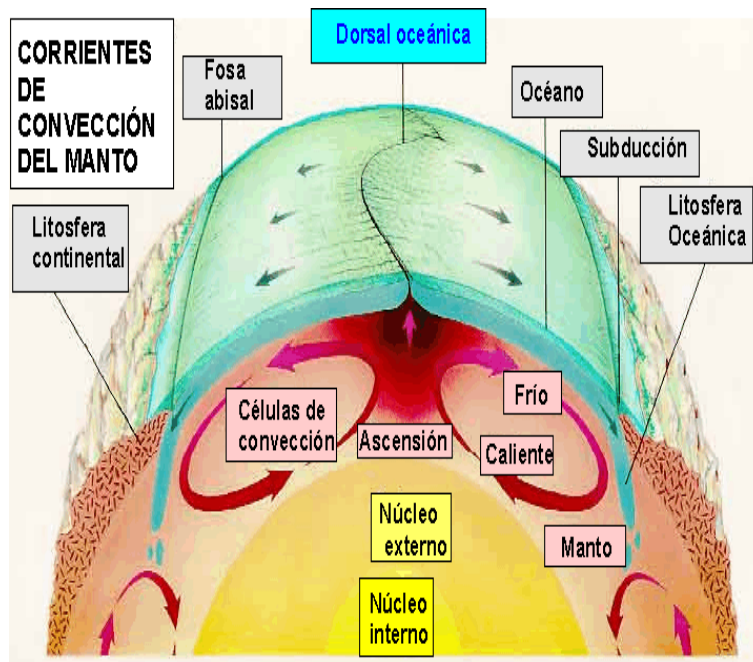
En aquellas rocas porosas que se localizan encima del nivel del agua subterránea en una profundidad superficial del subsuelo y en aquellas rocas situadas en profundidades tan altas, donde todos los espacios porosos están cerrados debido a la presión ambiental, dicha corriente se mantiene en forma de la conducción electrónica y ocurre adentro de los granos minerales. En este orden de ideas la resistividad eléctrica depende de las verdaderas propiedades microscópicas de la roca, y para el caso de aquellas rocas en las cuales sus espacios porosos están saturados con fluidos, dicha resistividad dependerá de la resistividad de los fluidos.

2.3.5.6 Conductividad Térmica

La conductividad es la transmisión de calor dentro de las capas de las rocas, desde el interior del planeta a la superficie. El trayecto que realiza el calor se conoce con el nombre de flujo térmico.

Aquí se dan unos movimientos conocidos como corrientes de convección que son los que llevan a cabo los fluidos. Cuando éstos materiales se calientan, tienden a dilatarse y ascienden a la superficie. Una vez lleguen estos materiales a la corteza terrestre sufren un enfriamiento y se contraen haciendo que descendan hasta alcanzar el núcleo de la tierra nuevamente, momento en el cual el ciclo vuelve a iniciar.

Figura 44. Corrientes de convección



Fuente: Silvanus Phillips Thompson, Elementary Lessons in Electricity and Magnetism. 1915

2.4 MARCO CONTEXTUAL

2.4.1 Cuencas Sedimentarias de Petróleo en Colombia

2.4.1.1 Cuenca Caguan Putumayo

Esta cuenca se encuentra ubicada en el suroccidente del territorio Colombiano, tiene una extensión de 110.304 kilómetros cuadrados, la comprenden los departamentos de Caquetá, Meta y Putumayo, esta limita al norte con la Sierra de la Macarena, al sur con la frontera de Perú y Ecuador, al occidente con la Serranía de Chiribiquete y al oriente con el sistema de Fallas de Pie de Monte de la cordillera oriental.

Su formación generadora es Villeta, su formación productora son: caballos, villeta y pepino.

Esta produce a diario un promedio de 3,253 barriles por día clasificados así:

53 Crudo mediano, 3200 Crudo liviano, aunque este no posee producción de crudo pesado

Su producción de aceite está entre los 16 grados a 52 grados de densidad (API).

Los campos que posee son:

La cuenca del Caguan – Putumayo tiene más de 41 campos, de estos se encuentran principalmente los de Tibu, Sardinata, Rios Zulia y Carbonera.

En Caballos es en el que más producción se lleva a cabo; este presenta 13 campos descubiertos, produciendo crudo de 22 a 42 grados de densidad API. Aquí se podría decir que posee un recurso importante en razón de las fracturas del basamento y las unidades cretácicas.²⁴

2.4.1.2 Cuenca Valle Superior del Magdalena

Esta cuenca sedimentaria se encuentra ubicada hacia el sur de Colombia, justamente donde se encuentran las cordilleras oriental y central, principalmente el grupo de villeta y en especial la formación la luna, por tal razón se considera esta la roca fuente principal, ya que esta roca se encuentra en relación con los Caballos Monserrate y Gualanday.

Su formación generadora es Payande y Villeta.

Su formación productora: Caballos y Villeta

Esta se extiende desde Pitalito en el sur hasta el norte en Honda

En cuanto su producción esta cuenca produce en el día aproximadamente 88.000 galones; entre los cuales 26000 son de crudo pesado, 53000 de crudos medianos, 9.000 crudos livianos.

²⁴ <http://colombiaenergia.com/article/cagu%C3%A1n-putumayo-una-frontera-promisoria-y-exigente>

En esta cuenca se producen anualmente 28000 millones de barriles de petróleo; sus aceites están entre los 20 a 27 grados de densidad API.

Entre los campos están los de Tello y la Jaguará, San Francisco, Yaguará y Río Ceibas y Matachín.²⁵

2.4.1.3 Cuenca Valle Medio del Magdalena

Esta cuenca está localizada a lo largo de la parte central del Valle Río del Magdalena, esta es una de las cuencas con mayor exploración y más productiva de nuestro País, en esta se encuentran más de 50 campos, el campo Cira-Infantas es el primer campo inmenso que fue descubierto. Esta cuenca es considerada madura y su producción es muy alta y se han hecho evidentes hidrocarburos luego de casi un siglo de exploración en esta cuenca, en 51 campos, entre estos Cira-Infantas.

Su formación productora: Lizama, La Paz, Mugrosa, Colorado y la Luna.

Su formación generadora: La Luna

Está localizada entre la cordillera central y oriental y con límites entre las Fallas de Bucaramanga y Cambao,

Su producción diaria está entre 99000 galones diarios, entre los cuales 65000 son de crudo pesado, 32000 de crudo mediano y 2000 de crudo liviano; y su producción en cuanto aceite oscila entre los 14 y 40 grados de densidad API.

Esta cuenca cuenta con 99 campos, entre estos se encuentran los campos de: Aguas Blancas, Cira infantes, Colorado, La Salina, Conde, Peñas Blancas, Yarigui/Cantagallo, Casabe, Palagua entre otros.²⁶

²⁵ http://archives.datapages.com/data/colombia_acgpp/simp7/tomo1/033.htm

²⁶ MONDRAGON, JC., MAYORGA, M., RODRIGUEZ ., 2009. Nuevas Perspectivas Exploratorias en el Sur de la Cuenca del Valle del Medio del Magdalena (COLOMBIA).ACGGP.

2.4.1.4 Cuenca Valle Inferior Del Magdalena

Esta cuenca limita tanto al norte como al oeste con el sistema de fallas de Romeral, hacia el sur y suroeste con la cordillera central y Rocas de Samaria de San Lucas. Por el oeste limita con el sistema de fallas de Bucaramanga y Santa Marta.

Esta cuenca está dividida en dos subcuencas la de San Jorge y la de Plato, estas están separadas por el Arco de Cicuco o de Magangue, posee recursos orgánicos y existe presencia de Kerogeno: estos son insolubles en los solventes orgánicos comunes, debido a su enorme peso molecular (por encima de 1.000 Daltons) y dan lugar a la generación de gas y petróleo.

Su formación generadora es la Ciénaga de Oro.

Las formaciones productoras de esta cuenca son: Porquero, Tubara, y la Ciénaga de Oro.

En cuanto a su ubicación está localizada al noroeste de nuestro territorio Colombiano, su producción oscila entre los 458.000 galones diarios, de los cuales 70.000 son crudos pesados, 10.000 son crudos medianos y 378.000 son crudos livianos; y la producción de aceites pueden variar desde los 30 a 52 grados de densidad API.

En relación a sus campos: esta cuenta con 23 de ellos, y se encuentran entre ellos los campos de Cicuco y Díficil.²⁷

2.4.1.5 Cuenca De Los Llanos Orientales

El norte de esta cuenca se prolonga en Venezuela, más allá del Rio Arauca, al sur limita con la saliente del Vaupés llamado también Arco del Guaviare, al oriente limita con el escudo de Guayanés, y con la cordillera oriental hacia el occidente.

²⁷ http://archives.datapages.com/data/colombia_acggp/simp7/tomo1/020.htm

Sus límites morfológicos se pueden describir así: La Cuenca de Barinas en el norte, con la Serranía de la Macarena y el Arco de Vaupés hacia el sur, hacia el oeste con el sistema de fallas de Guaicaramo y al este con el Escudo de Guayana

La cuenca sedimentaria de los llanos Orientales es considerada como la más productora del país, es la que más campos posee, cuenta con 118, entre sus campos principales están: Cuasina, Apiay, Cupiagua, Caño Limón, Rubiales y Castilla. En este sentido esta cuenca representa el 41% de los campos activos de nuestro territorio.

La formación generadora de esta cuenca se encuentra en Gacheta y Carbonera.

Su formación productora en Mirador y Carbonera.

Se encuentra localizada en el oriente del territorio Colombiano.

Su producción oscila entre los 425.000 de barriles de petróleo diario; entre los cuales 187.000 son de crudo pesado, 122.000 de crudo mediano y 116.000 crudo liviano, y su producción de aceites está entre los 22 a 42 grados de densidad API, la mayor parte de gas que se produce es originada en Chuchupa y Ballenas.²⁸

2.4.1.6 Cuenca Catatumbo

Esta cuenca conforma un área compartida entre Colombia y Venezuela, se caracteriza por la presencia de diversos recursos acuáticos, como por ejemplo los valles de los ríos de Catatumbo y Zulia, sin embargo se ve afectada con las aguas residuales y todos los residuos de sólidos que se dispersan sobre el río.

Está localizada al noroeste del territorio Colombiano.

Su producción diaria es de 3230 barriles diarios, de los cuales 30 son de crudo mediano, y 3200 de crudo liviano, en efecto esta cuenca no produce crudo pesado

²⁸ <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-eofisica/Tesis/AEROGEOFISICA%20LLANOS%202008.pdf>

de igual manera que la cuenca de Caguán Putumayo, y su producción de aceites oscila entre los 16 a 52 grados de densidad API.

Esta cuenca presenta formaciones que fueron originadas en las eras terciaria y secundaria entre las cuales se pueden mencionar las siguientes formaciones: Guayabo, Carbonera, Cuervos, Catatumbo, Luna, Capacho, Mirador, León, Tibu, Mitojuan, Colon, y Orystaline basement.²⁹

2.4.1.7 Cuenca Guajira

La característica principal de esta cuenca es que solo produce yacimientos de gas en atención a sus condiciones geológicas, está localizada al norte de nuestro país, limitando al occidente con el mar Caribe, al oriente con Venezuela y al sur con el departamento de Cesar.

Las formaciones de esta cuenca son: Jimol, Uitpa, Siamana, Guamaralay, Castilletes, La Luna, Yurima, Cogollo y Palanz, dentro de estas la más importante es la Luna, ya que posee una serie de rocas que se encuentran distribuidas en el norte de Suramérica. Lo que incide en la economía y ha favorecido la existencia de Ecopetrol.³⁰

²⁹ <http://books.google.com.co/books?id=hJ1AbX8qHV4C&pg=PA74&dq=colombia+andina>

³⁰ <http://es.slideshare.net/macorca123/cuencas-sedimentarias-de-colombiadoc-1>

Figura 45. Cuencas sedimentarias en Colombia



Fuente: Tomada del libro de la ANH (Asociación Nacional De Hidrocarburos).

2.4.1.8 Cuencas No Productoras en Colombia

Dentro de estas cuencas denominadas no productoras están: Choco, Choco marino Colombia Pacifico , Marino en la Cordillera oriental, Amaga Cauca-Patía

Cesar-Ranchería ,Los cayos como Sinú, San Jacinto, Sinú marino, Tumaco, Tumaco Marino, Urabá, Vaupés y Amazonas.³¹

2.5 MARCO LEGAL

2.5.1 Normatividad

Conocer la reglamentación que rige el sector petrolero es fundamental para tomar decisiones acertadas. Por tal razón en este aparte se quiere destacar aquellas bases legales generales y específicas reglamentadas para este sector.

2.5.1.1 Bases Legales Generales

Constitución de 1886

Con la Constitución Política de 1886 (art. 202). Se establece el principio de la propiedad estatal del petróleo en nuestro País. Se instituyó como principio la propiedad del Estado sobre el subsuelo y por tanto sobre los recursos naturales, en este caso los no renovables, ya que estos dan origen al pago de regalías a cargo de los explotadores de estos.

Constitución de 1991

Con la Constitución de 1991, la orientación económica del país que se había tomado con la constitución de 1886; cambio notablemente. Con la carta magna en mención los elementos económicos tuvieron un mayor compromiso con el gasto público social.

Según lo anterior con esta Constitución se protege y se estimula el derecho a la iniciativa y a la propiedad privada, sin embargo impone obligaciones sociales y ecológicas por lo cual se ven sujetas al interés general. Es decir que por un lado esta exige que “El Estado, por mandato de la ley, impedirá que se obstruya o se

³¹ http://consultorescolombianos.com/yahoo_site_admin/assets/docs/PetroleoYfuturo.4052902.pdf

restrinja la libertad económica y evitará o controlará cualquier abuso que personas o empresas hagan de su posición dominante en el mercado nacional”³² de igual manera estipula como derecho colectivo la libre competencia económica, con este se permite a cualquier ciudadano interponer acciones populares contra cualquier actuación oficial o privada que limite la afluencia en el mercado.

Por otra parte la Constitución de 1991 otorgo poder amplio al Estado en lo relacionada con “la explotación de los recursos naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes, y en los servicios públicos y privados” “con el propósito de “conseguir el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, la distribución equitativa de las oportunidades y los beneficios del desarrollo y la preservación de un ambiente sano”.³³

En ese orden de ideas esta Constitución dio a conocer varios aspectos con lo relacionado a la normatividad que estipulan la propiedad de los yacimientos de hidrocarburos.

Así por ejemplo con el artículo 332 se dispone que: “El Estado es propietario del subsuelo y los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.” De la misma manera se reconoció, que todo tipo de explotación de productos minerales y energéticos traen consigo el pago de regalías.

Esta Constitución además de conservar los derechos a percibir regalías de cada uno de los departamentos donde existen yacimientos minerales, también lo aplica para los municipios portuarios y ordenó la creación de un fondo de regalías, cediéndole a este fondo el porcentaje que mucho antes ingresaba a la Nación

³² Título 12 - Del régimen económico y de la hacienda pública / Capítulo 1: De las disposiciones generales.

³³ <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2012/C-384-12.htm>

En atención a lo anterior el Artículo 360 de la carta Magna, establece que las entidades territoriales en las que se explotan, y los puertos tanto fluviales como marítimos, a través de los cuales se transportan los recursos naturales no renovables; serían las beneficiadas de estas regalías.

Con el Artículo 361 crea el Fondo Nacional de Regalías (FNR) y establece los sectores en los que se debe invertir como lo son la preservación del medio ambiente, los proyectos que cada región tenga en cuanto a inversión y la promoción de la minería.

2.5.1.2 Bases Legales Específicas

Decreto 1056 de Abril de 1953 “Código de Petróleos” Por el cual se expide la codificación de las disposiciones legales y reglamentarias vigentes sobre petróleo.

Decreto 1385 de 1987 “Reglamento de seguridad en las labores subterráneas”. Por el cual se estipulan las reglas sobre la higiene y seguridad minera en todas las labores subterráneas.

Ley 141 de 1994” Creación del Fondo Nacional y de la Comisión Nacional de Regalías” Por la cual se crea el FNR y la Comisión Nacional de Regalías y se regula el derecho del Estado para percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables.

Decreto 2636 de 1994 “Explotaciones de hecho de pequeña minería” Mediante este decreto se legaliza las explotaciones de hecho de pequeña minería.

Decreto 501 de 1995 “Inscripción de los títulos mineros en el registro minero” Por el cual se reglamenta la inscripción en el registro minero de los títulos para la exploración y explotación de los minerales de propiedad nacional.

Decreto 1184 de 1995 “Forma de pago del canon superficiario”. Modifica la forma de pago del canon superficiario con un término de 10 días siguientes a la inscripción del registro minero.

Decreto 1385 de 1995 “Mecanismos de conciliación” Mediante este decreto se establecen los mecanismos de conciliación para los eventos de superposiciones de áreas entre explotadores de hecho y títulos mineros otorgados.

Decreto 1481 de 1996 “Requisitos para la inscripción de títulos en el registro minero”. Por el cual se establece la obtención de la licencia ambiental para la inscripción de los aportes en el registro minero nacional.

CAPITULO III. METODOLOGIA

3.1 TIPO DE INVESTIGACION

Para el proceso de desarrollo de este trabajo, se estableció como mejor opción el estudio de tipo deductivo, ya que pretende describir la exploración, detección del petróleo y brindar los elementos conceptuales para un dispositivo de rastreo de trampas usando señales electromagnéticas inducidas.

3.2 METODO DE INVESTIGACION

El método empleado para el desarrollo de este trabajo es el de análisis y síntesis por cuanto aquí se recogen los datos sobre las bases teóricas, enfocada a los métodos de rastreo de petróleo; se exponen y resumen la información de manera cuidadosa y luego se analizan minuciosamente los resultados, a fin de extraer generalizaciones significativas que contribuyan al conocimiento.

Para esto en primera medida se procederá a revisar la bibliografía de forma que se logre determinar los principales componentes y procesos para la exploración de hidrocarburos. Así mismo se logrará describir la forma general de las características físicas y geológicas de las trampas de hidrocarburos.

Ya con lo anterior definido, se procederá a describir y determinar mediante revisión bibliográfica algunas características electromagnéticas relevantes del material que compone la trampa de petróleo así como del petróleo mismo. Dentro de otras se procurará obtener peso específico, permeabilidad, permitividad, coeficiente de resistividad, coeficiente de conductividad.

Ya con lo revisado en el estado del arte se procurará proponer un método para el estudio y análisis de yacimientos de petróleo usando las señales electromagnéticas. Así mismo, se explorará y se expondrán, si existieran, casos

en los que se esté usando una detección de trampas de petróleo mediante señales electromagnéticas.

Finalmente se definirán unas características generales que deberá tener todo dispositivo que se apreste a ser usado para la descripción de subsuelo y detección de trampas de hidrocarburos.

3.3 POBLACION Y MUESTRA

Para el desarrollo de este trabajo, la población corresponde a toda la documentación soporte relacionada a las industrias petroleras y se tomó como muestra el proceso de exploración del petróleo.

3.4 FUENTES PARA LA RECOLECCION DE DATOS

Para esta investigación se utilizaron dos tipos de fuentes de información como lo son:

- **Información primaria:** La cual fue extractada de libros, artículos, revistas.
- **Información secundaria:** Se partió de los conocimientos recabados a través de análisis documental existente de investigaciones realizadas sobre temas relacionados a la exploración y explotación de petróleo.

3.5 TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario valerse de algunos instrumentos metodológicos tales como:

3.5.1 Análisis Documental

Esta parte está basada en el estudio y análisis efectuados en las fuentes de información que se encontró con el objeto primordial de conocer las diferentes formas y métodos de exploración de petróleo, la forma como se encuentra distribuido el subsuelo, sus componentes y características magnéticas.

CAPITULO IV. PROPUESTA

4.1 DESCRIPCION ELECTROMAGNETICA DEL SUELO PARA EL HALLAZGO DE TRAMPAS DE PETROLEO

Los iones que emite el sol sobre nuestro planeta, permiten experimentar un proceso confuso de interacción con el campo magnético de la tierra, logrando generar campos electromagnéticos que se expanden en el interior del suelo interactuando con los horizontes y los medios conductivos y resistivos. Estos medios conductivos atenúan las ondas electromagnéticas. Por lo general las rocas son muy malas conductoras de electricidad, de tal manera que los fluidos alojados en los poros del subsuelo, poseen conductividades diferentes³⁴.

Los hidrocarburos poseen una alta resistividad a diferencia de la salmuera que es muy conductiva, por lo tanto las formaciones de yacimientos de petróleo rodeados de salmuera permiten verificar claramente la diferencia de resistividad que afecta el campo electromagnético que se propaga en el interior. Esta diferencia de resistividad se nota significativamente en los sedimentos rellenos de salmuera y algunos estudios litológicos específicos, como la sal, el basalto y los carbonatos.

Las corrientes eléctricas tanto estáticas como variables que circulan en el interior de la tierra son inducidas por campos eléctricos y magnéticos naturales o artificiales. La magnetotelúrica³⁵ es un método que permite medir la resistencia eléctrica en las profundidades en base a estas corrientes y gracias a este método

³⁴ PEREIRA BUONORA, Marcolo Polo, RODRIGUEZ Luis Felipe, CAMPBELL, Chuck, ZERILLI, Andrea, PATMORE, Steve, "Sondeos Electromagnéticos para la exploración de petróleo y gas", Oildfield Review Spring 2009:21 N°1.

³⁵ Técnica que consiste en medir desde la superficie las fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales de la Tierra (tormentas eléctricas, corrientes ionosféricas) y determinar la distribución de la resistividad eléctrica en función de la frecuencia (periodo), es decir, en función de la profundidad (desde unos centenares de metros hasta unos centenares de kilómetros).

los geofísicos han determinado que a medida que se es más profundo, la resistividad aumenta.

Como se explicó anteriormente los horizontes poseen componentes minerales que interactúan con estos campos electromagnéticos. Un pozo de petróleo se encuentra compuesto de rocas sedimentarias comunes como: Lutita, Caliza, Arenisca, Limolita, Dolomita y Anhidrita. La mayoría de los minerales componentes de las rocas no poseen características conductivas de electricidad.

Figura 46: Valores de resistividad de algunas rocas

Roca	Resistividad
Lutitas	de 1 a 10 Ohm-m
Arenas con agua salada	de menos de 0.5 a 10 Ohm-m
Arenas con hidrocarburos	de 1 a 100 Ohm-m
Calizas	de 10 a 500 Ohm-m

<https://es.scribd.com/doc/170368952/Propiedades-Elctricas-Radiactivas-y-Acusticas-de-Las-Rocas>

4.1.1 Horizonte A

En este horizonte se concentra la materia orgánica, presenta cargas negativas, hecho que les permite absorber cationes y ser una capa muy conductiva, en esta capa se generan acumulaciones de arena y limo. La arena se forma principalmente por silicatos (Oxígeno + Silicio), éstos poseen densidad media, son duros y translucidos. El silicio es un elemento semiconductor, en la arena se encuentra generalmente en forma de cuarzo con una permeabilidad magnética aproximada de 0,999985 [H/m] y una permitividad relativa variable dependiendo el estado en el que se encuentre (seco o con componente líquido en el interior) de 3,8 a 12 [F/m]. Las arenas de las costas tropicales se conforman por piedras calizas erosionadas, la caliza es una roca compuesta por carbonato de calcio, calcita, mica y magnetita generalmente, aunque en algunos casos se encuentra arcilla, hematita y siderita³⁶. El rango de permeabilidad magnética de estos

³⁶ <http://es.wikipedia.org/wiki/Arena>

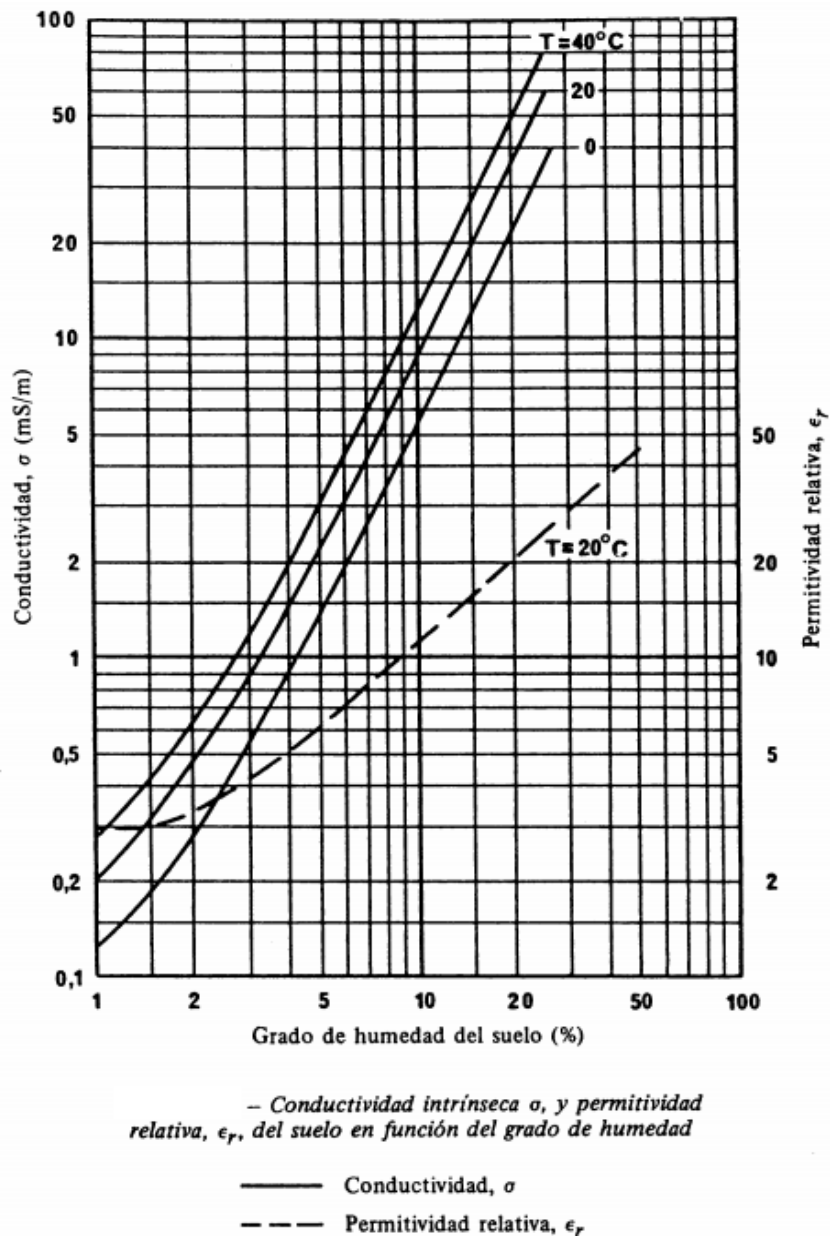
minerales oscila entre los 0,999987 [H/m] en el caso de la calcita, hasta los 5 [H/m] en el caso de la magnetita que es la de mayor permeabilidad y para la permitividad relativa el rango oscila entre los 5,6 y los 7 [F/m] como en el caso de la mica.

4.1.2 Horizonte B

Este horizonte está compuesto de material arcilloso con minerales como aluminio, oxido de aluminio y carbonato de calcio, minerales que son arrastrados del horizonte superficial por efecto de escurrimiento. El aluminio posee una permeabilidad magnética de 1 [H/m] y una resistividad de 0,0286 [Ω m]. Este horizonte está conformado además por depósitos de caliza, viene siendo una zona muy conductiva y con un nivel muy bajo de permeabilidad por el hecho que el material arcilloso permite la acumulación de aguas subterráneas. Normalmente la arcilla posee un valor de conductividad cercano a 10^{-2} [S/m] y se ha podido observar que este valor disminuye estando la arcilla en estado seco a un valor de 10^{-4} [S/m] valor igual al del granito. Dentro de esta zona también se pueden encontrar pequeñas cantidades de minerales entre ellos el cuarzo, mineral que en estado seco no es considerado conductor pero posee características piezoeléctricas cuando es sometido a una presión o tensión, por lo tanto su masa adquiere una polarización eléctrica y una diferencia de potencial permitiendo la aparición de cargas eléctricas en la superficie, estas cargas interactúan con el campo haciendo que tomen comportamientos diferentes y no la regularmente³⁷. El grado de humedad en el interior del suelo, influye en el valor de la conductividad y la permitividad relativa.

³⁷ <http://es.wikipedia.org/wiki/Cuarzo>

Figura 47. Valores de conductividad y permitividad en función de valores de humedad.



Fuente: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.229-6-1990-PDF-S.pdf

El rango de resistividad de las rocas se pueden clasificar como buenas, intermedios y malas conductoras; en el rango de buenos conductores se pueden encontrar valores de 10^{-8} [Ωm] hasta 1 [Ωm], en los intermedios se encuentran

valores desde 1 [Ωm] hasta 10^7 [Ωm] y para los malos conductores el rango es mayor a 10^7 [Ωm].

Para el caso de la resistividad en el agua se pueden encontrar diferentes rangos a partir de la composición líquida. Para el caso de agua meteórica, la resistividad llega hasta un valor de 10^3 [Ωm], para el agua de suelo el valor es de hasta 100 [Ωm] y para el agua salina (20%) es hasta 0,05 [Ωm].³⁸

4.1.3 Horizonte C

Este horizonte se encuentra compuesto por partículas de materiales rocosos, los materiales que predominan son limos arcillosos y arenas limosas con apariencia de roca dura seca pero con consistencia de suelo, esta zona presenta una elevada permeabilidad, la conductividad en las rocas varía con la temperatura, en algunos casos la presencia de agua en el interior de estas permite el flujo eléctrico, por ende su resistividad disminuye dependiendo la cantidad de agua que estas rocas tengan. En este horizonte abundan los minerales de hierro y aluminio, el hierro es un material ferromagnético con permitividad relativa con valores mucho mayores a 1 y aproximadamente hasta 5000, el hierro posee una resistividad de $9,71 \times 10^{-8}$ [Ωm], mientras que el aluminio presenta valores de conductividad de $3,54 \times 10^7$ [S/m] y una permeabilidad relativa de 1,000021.

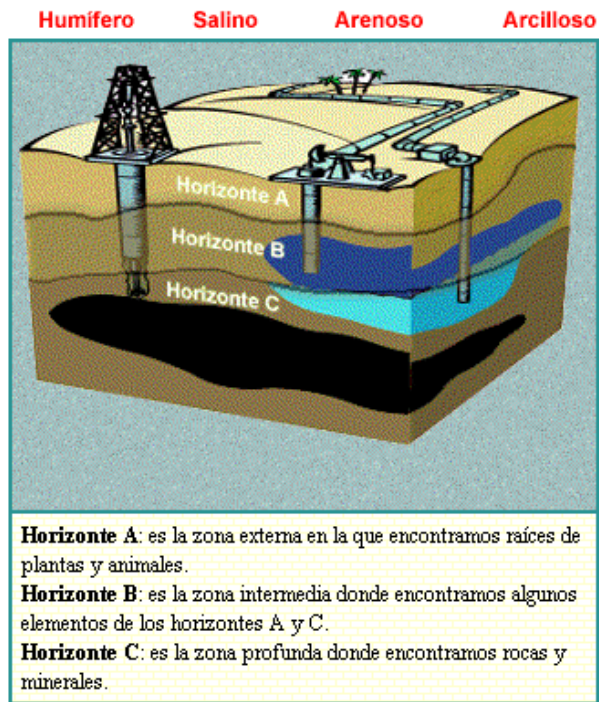
En este horizonte es donde comúnmente se encuentran los yacimientos de petróleo y gas, a estos elementos se les da un valor de conductividad igual a cero y una permitividad relativa en un rango entre 2 y 3.³⁹

³⁸ http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.229-6-1990-PDF-S.pdf

³⁹

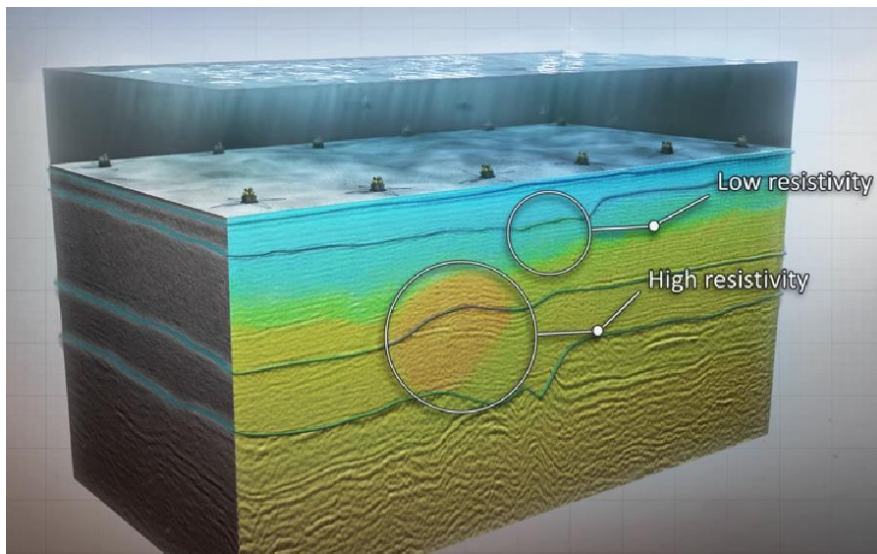
https://books.google.com.co/books?id=8aipFzSCKnkC&pg=PA470&lpg=PA470&dq=permitividad+relativa+del+aluminio&source=bl&ots=Xj0VPRbr7n&sig=S9hOWfyZzLmyh7BqLYzj9TQUW0&hl=es&sa=X&ei=7rUVVZLNNJD_ggT04YHwDA&ved=0CD4Q6AEwBQ#v=onepage&q=permitividad%20relativa%20del%20aluminio&f=false

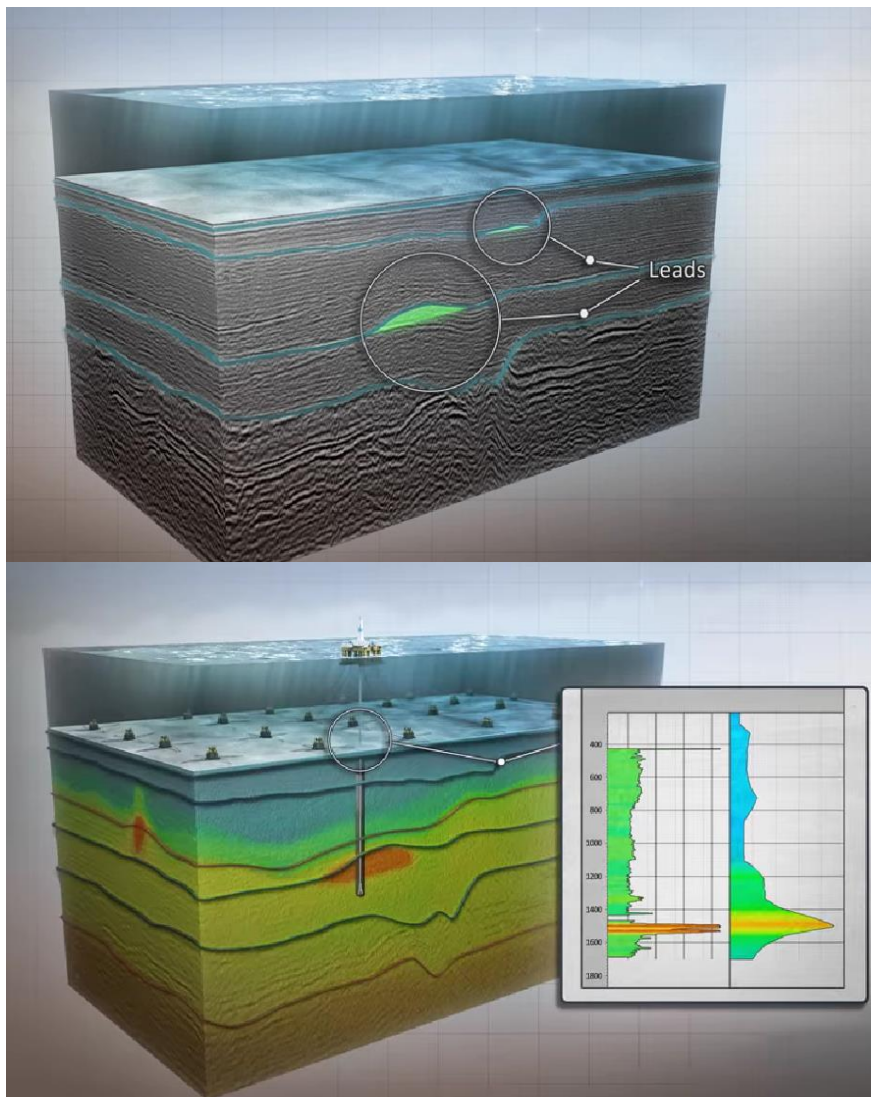
Figura 48. Componentes de los Horizontes



Fuente: <http://creaconlaura.blogspot.com/2008/11/conocimiento-del-medio-el-suelo.html>

Figura 49. Esquema de sondeo 3D resistivo del interior del suelo marino.





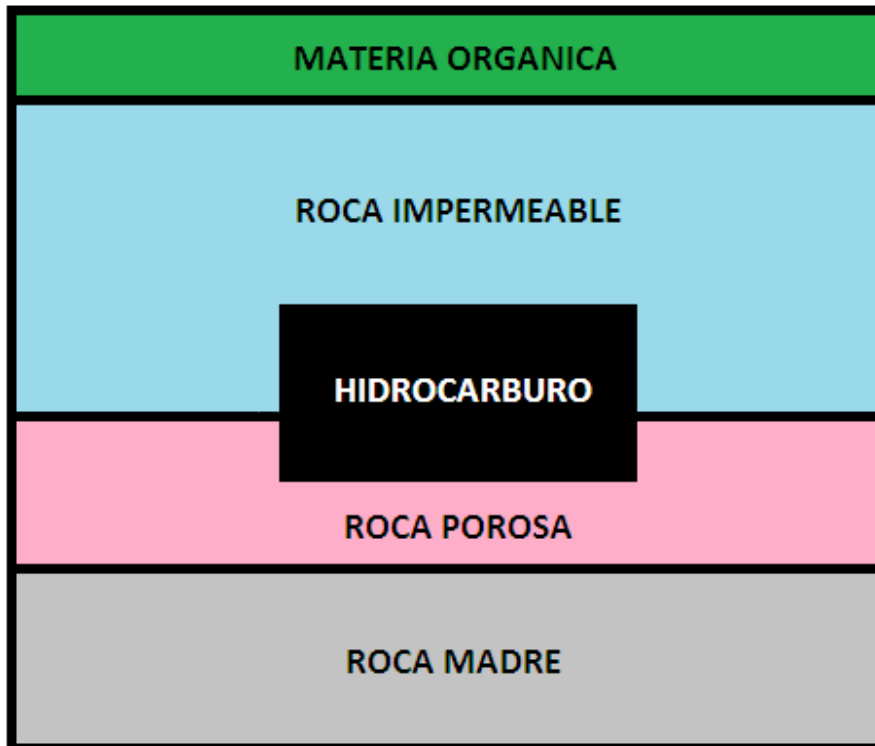
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=3K7uXjwVD7M>

4.2 DESCRIPCION DE UN MODELO IDEAL DE UNA TRAMPA DE PETROLEO

Se desea estudiar dos fenómenos que se presentan en la naturaleza para la formación de trampas de petróleo (trampas anticlinales y trampas por fallas estratigráficas), estas son las más comunes en el hallazgo de yacimientos.

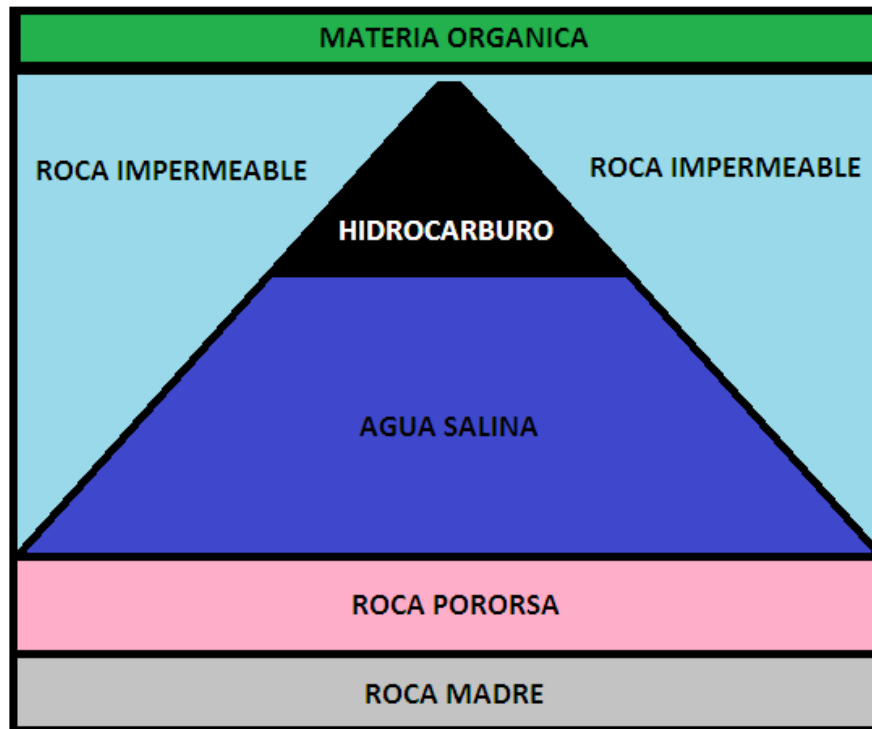
Para el modelado de la trampa anticlinal se supondrá una trampa de forma cubica, recubierta por debajo por sedimentos porosos permitiendo la fluidez del hidrocarburo y por encima con material impermeable que evite su emigración. Esta trampa se supondrá entre los Horizontes B (color azul claro) y C (color rosa).

Figura 50. Modelo de Trampa Anticlinal



Para el modelado de la trampa por falla estratigráfica, se supondrá una trampa con forma triangular, recubierta por debajo por un domo salino; en las partes laterales y por encima tendrá una capa impermeable que evite la filtración del hidrocarburo. Esta trampa se supondrá en el Horizonte B (color azul claro).

Figura 51. Modelo de Trampa por falla Estratigráfica



Para analizar los anteriores modelos se debe considerar la teoría electromagnética de las cuales dos condiciones son muy importantes para su estudio.⁴⁰

1. Considerar las ecuaciones de maxwell descritas de la siguiente manera de forma diferencial:

“H” = intensidad de campo magnético [A/m]

“E” = intensidad de campo eléctrico [V/m]

“B” = vector de inducción magnética [Wb/m²]

“D” = vector de desplazamiento eléctrico [C/m²]

“J” = densidad de corriente [A/m²]

⁴⁰ <http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/018706-Libro.pdf>

$$\nabla \times H = J_c + (\partial D / \partial t) \quad ; \text{ ley de Ampere}$$

Esta ley establece la relación entre los campos eléctricos y magnéticos, con las corrientes eléctricas, a su vez establece una relación simétrica de la inducción como un campo eléctrico variable de la cual se puede genera un campo magnético y este a su vez generar una corriente eléctrica de circulación.

$$\nabla \times E = - (\partial B / \partial t) \quad ; \text{ ley de Faraday}$$

Esta ley también conocida como la ley de inducción electromagnética, establece como un flujo de campo magnético variable en el tiempo, induce una corriente eléctrica de circulación en un circuito.

$$\nabla \bullet D = \rho \quad ; \text{ ley de Gauss para campos eléctricos}$$

Esta ley establece que el flujo del campo eléctrico total a través de una superficie cerrada, es igual a la carga neta o suma de las cargas que se encuentran en el interior de la superficie, dividida entre la constante de permitividad eléctrica en el vacío (ϵ_0), dado que las líneas de campo eléctrico comienzan en cargas positivas y terminan en cargas negativas. Por convención, si el valor de la expresión es positivo, el vector sale de la carga, pero si la expresión es negativa, el vector entra a la carga.

$$\nabla \bullet B = 0 \quad ; \text{ ley de Gauss para campos magnéticos}$$

Esta ley establece que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es igual a cero, por lo tanto se dice que sobre una superficie cerrada sea cual sea, no seremos capaces de encerrar una fuente o sumidero de campo y este no divergirá, de esta manera el número de líneas de campo magnético que entran a la superficie, es igual al número de líneas que salen de él. Por lo tanto se determinan que no existen monopolos magnéticos, sino dipolos o multipolos magnéticos.

2. Tener en cuenta la propagación del campo electromagnético y sus condiciones de frontera con base en las ecuaciones de maxwell.

Estas condiciones de frontera permiten determinar las propiedades transicionales del campo electromagnético que involucran una frontera entre dos materiales diferentes y en consecuencia con diferentes valores de conductividad, permitividad y permeabilidad.

Lo primero que se debe considerar es el vector intensidad de campo eléctrico total (**E_T**), el cual se descompone en campo eléctrico tangencial a la superficie de frontera (**E_t**) y en campo eléctrico normal a la superficie de frontera (**E_n**).

Para deducir las componentes tangenciales de los vectores del campo, se usa la ecuación,

$$\oint_S (\hat{n} \times \mathbf{E}) dS = 0$$

Los componentes tangenciales de los vectores de la intensidad de campo son continuos al pasar de un medio a otro.

$$\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t}$$

Por lo tanto la condición de frontera para la componente tangencial de la densidad de flujo eléctrico $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, queda:

$$(D_{1t} / \epsilon_1) = (D_{2t} / \epsilon_2)$$

Para deducir la condición que debe cumplir la componente normal de los vectores del campo, se usa la ecuación,

$$\oint_S (\hat{n} \bullet \mathbf{D}) dS = \int_V \rho dv$$

Al aparecer una capa de carga en la interfaz, resulta un cambio salvaje en la componente normal del vector de la densidad de campo \mathbf{D} , por lo tanto la componente \mathbf{D} es discontinua al pasar de un medio a otro y la cantidad de discontinuidad es igual a la densidad de carga superficial presente.

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s$$

Por lo tanto la condición de frontera para la componente normal del campo \mathbf{E} es:

$$\epsilon_1 E_{1n} - \epsilon_2 E_{2n} = \rho_s$$

4.3 PROPUESTA DEL APARATO DETECTOR DE TRAMPAS DE PETROLEO

Dado que el objetivo del aparato consiste en detectar hidrocarburos en el interior del suelo (a partir del descubrimiento de las capas no conductoras, las cuales se considerarían posibles formaciones de hidrocarburos, y las capas conductoras

consideradas formaciones acuíferas), la idea es lograr identificar estos yacimientos de petróleo en base a las medidas que se consideran aptas para el hallazgo, como son el caso de la resistividad del terreno, la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica la cual agilizarían en el estudio y análisis de muestras y barridos que se harían en el terreno estudiado.

El aparato detector de trampas de petróleo registraría unos datos con barridos de señales en base a las medidas antes descritas en un terreno seleccionado para el estudio; con estos resultados en tiempo real se analizaría las características del interior del terreno y se observarían las variedades que tienen cada capa u horizonte. El ingeniero a cargo deberá analizar y tomar medidas para aquellos registros tomados en el que se perciben diferencias en el interior en base a los modelos propuestos y clasificar esos datos para la toma de decisión final como por ejemplo mirar la profundidad de atrapamiento del petróleo, el tipo de trampa, las estructuras a su alrededor, si hay posible hallazgo de agua estancada para el caso de algunas trampas de hidrocarburos, etc.

4.3.1 Descripción del Aparato y configuración

La idea del artefacto es que pueda ser un sistema integrado eficiente con el fin de lograr optimización, reducir el tamaño y el costo, logrando de esta manera que la persona encargada de la recolección de datos pueda agilizar en el proceso y que el transporte no sea un inconveniente para el desarrollo del trabajo como por ejemplo en los casos donde el acceso de vehículos y uso excesivo de implementos de trabajo impidan en la recolección de información. El aparato estaría conformado básicamente por aquellos dispositivos que permitan la medición y procesamiento de datos como podrían ser la fuente, el transmisor, el receptor, un par de electrodos, el microprocesador, los conversores análogos-digitales, los amplificadores de potencia, los filtros, el magnetómetro, el monitor y el registrador de datos.

El mecanismo constara de un transmisor posiblemente con forma cilíndrica con un enrollamiento preferiblemente de alambre de cobre. Se transmitirá una señal con una forma de onda establecida, produciendo un barrido logarítmico de ondas armónicas con amplitud constante. Para generara un barrido de frecuencia, el generador da una señal con forma de diente de sierra que es la que controla la frecuencia. El barrido puede ser de forma lineal, que emplea el mismo tiempo en cada frecuencia, o de forma logarítmica, que es la que se usara para este caso, que emplea el mismo tiempo en cada década, de manera que se dedica más tiempo a las frecuencias más bajas del barrido. La señal transmitida que es una señal de voltaje de salida, se convertirá en una señal de frecuencia por medio de un convertidor con el fin de generar el barrido y se usara un rango de frecuencia entre 500Hz y 100KHz con una potencia máxima emitida por la fuente de 2Kw para el caso de estudios de tierra firme. Para los estudios marinos, el rango de frecuencia emitido para el barrido es entre 0,0001Hz y 100Hz con una potencia máxima emitida por la fuente aprox. de 50Kw, esta cantidad de potencia es debido a la gran distancia a la que se encuentra la superficie del suelo con respecto a la superficie marina y el rango de frecuencia para que las ondas de transmisión no se atenúen en el trayecto marino, aunque en algunos casos, otras investigaciones como la magnetotelurica aseguran un límite máximo de 1Hz (límite efectivo para los estudios marinos debido a la atenuación de frecuencias mayores).⁴¹

Los sistemas integrados en el caso de los estudios marinos son de mayor volumen para lograr el registro de datos y si se desea bajar el límite de frecuencia para lograr registros más profundos, solo se debe aumentar el número de vueltas del transmisor y receptor. La forma de onda real transmitida por la fuente es medida y registrada por el registrador de datos para el control de calidad con el objetivo de

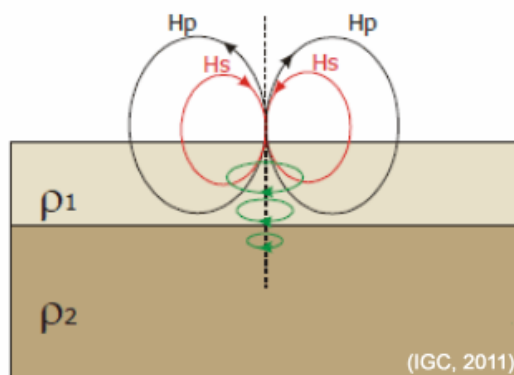
41

https://books.google.com.co/books?id=pMfgL_SimNQC&pg=PA146&lpg=PA146&dq=barrido+logaritmico&source=bl&ots=cgX16d1PrB&sig=5cYhhLsD8amSYwC3JSUHDvNG4Uo&hl=es&sa=X&ei=obkVVZTmA6v7sASa8oD4BA&sqi=2&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q=barrido%20logaritmico&f=false

que una vez recolectados los datos del receptor se sincronizan con la señal de onda de la fuente y se comparan los resultados.

Con la fuente se dará origen a una señal controlada que por medio de unos amplificadores y del transmisor se propagaran unas ondas de campo de mayor intensidad penetrando el suelo donde interactuaran con las formaciones resistivas-conductivas y se generara una onda de campo de respuesta, esa energía viaja hacia el receptor, la amplitud del campo secundario y los espectros de fase son medidos y digitalizados con un convertidor análogo-digital con el fin de recopilar los datos. Estas ondas se propagan más fácilmente a través de una formación resistiva que de una conductiva, por lo tanto la presencia de un yacimiento mejora la señal de respuesta en comparación con la señal de respuesta de concentraciones de agua salina, que carece de resistividad.

Figura 52. Esquema simple sobre el funcionamiento de la inducción electromagnética

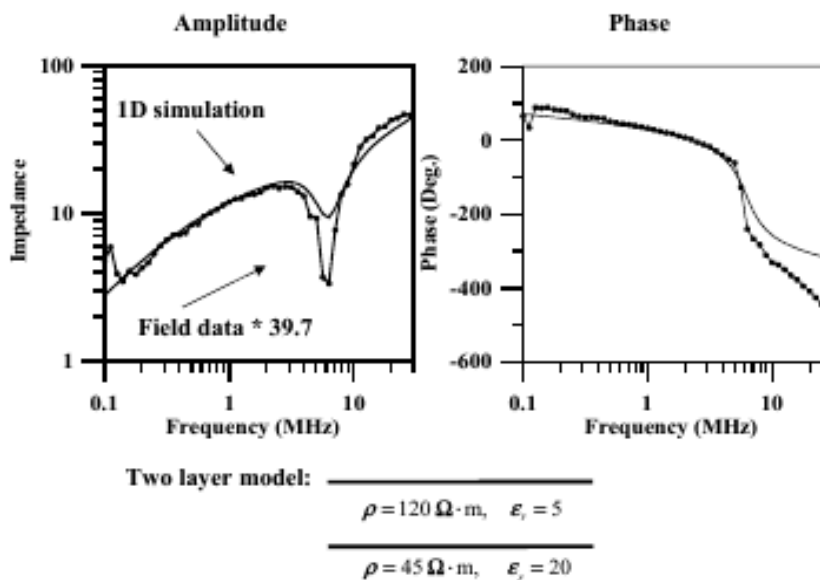


Fuente: http://www.igc.cat/web/es/geofisica_tec_magnetotelurica.html

Se propone emitir una intensidad de campo magnético con un aproximado de 0,15 [Teslas] en un intervalo de tiempo entre 0,5 y 1,5 [m/s]. La magnitud del campo magnético de respuesta para una distancia aprox. entre el transmisor y el receptor de entre 10 y 3m de distancia de separación esta entre 0,0001[nT] y 0,00003 [nT]

según artículos descritos.⁴² Todo el ciclo de medición estará controlado aparte del registrador de datos como por la unidad del microprocesador que se encargara de ejecutar y operar las aplicaciones, se repetirán las mediciones en un intervalo de tiempo para comparar, corroborar y lograr resultados óptimos, apilando los datos y comparándolos. En cada barrido de medición se tomaran las respuestas espectrales, tanto en amplitud y fase. Cada barrido se compondrá de una serie de cambios graduales de la frecuencia empezando desde una alta frecuencia hacia una baja frecuencia.

Figura 53. Diagrama de amplitud y fase de la impedancia (línea continua con puntos) derivado del campo eléctrico y magnético de un medio.



Fuente: <http://escholarship.org/uc/item/6x3572cc#page-7>

El receptor estará compuesto de un magnetómetro que será un enrollamiento de cable de menor calibre y menor número de vueltas que el transmisor, este magnetómetro detectara el flujo magnético y captara la respuesta del campo inducido generando una corriente sobre la base del flujo magnético a través de la

⁴²

https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish09/sum09/01_sondeos_electromagneticos.pdf, pg. 11.

bobina; a su vez se propone que el receptor tendrá a lado y lado un par de electrodos horizontales de cloruro de plata, que permitirá detectar la diferencia de potencial en el campo eléctrico horizontal. Para el caso de estudios marinos se incorpora otro electrodo adicional en forma vertical que permite las mediciones de una diferencia de potencial con el campo eléctrico vertical ya que en el medio marino aparecen estos campos debido al medio conductivo salino, este electrodo se ha propuesto y usado para otros dispositivos de rastreo marino.⁴³ Para el estudio en tierra firme, el campo eléctrico es el que responde de mejor manera a los cambios resistivos producidos en las capas internas del suelo a diferencia a los estudios marinos donde es el campo magnético el que muestra mejor respuesta a las variaciones producidos en la estructura del subsuelo, aunque ambos contienen y reservan información sobre la estructura; los resultados se pueden interpretar como una estructura de resistividad o conductividad de la tierra en el área de estudio.

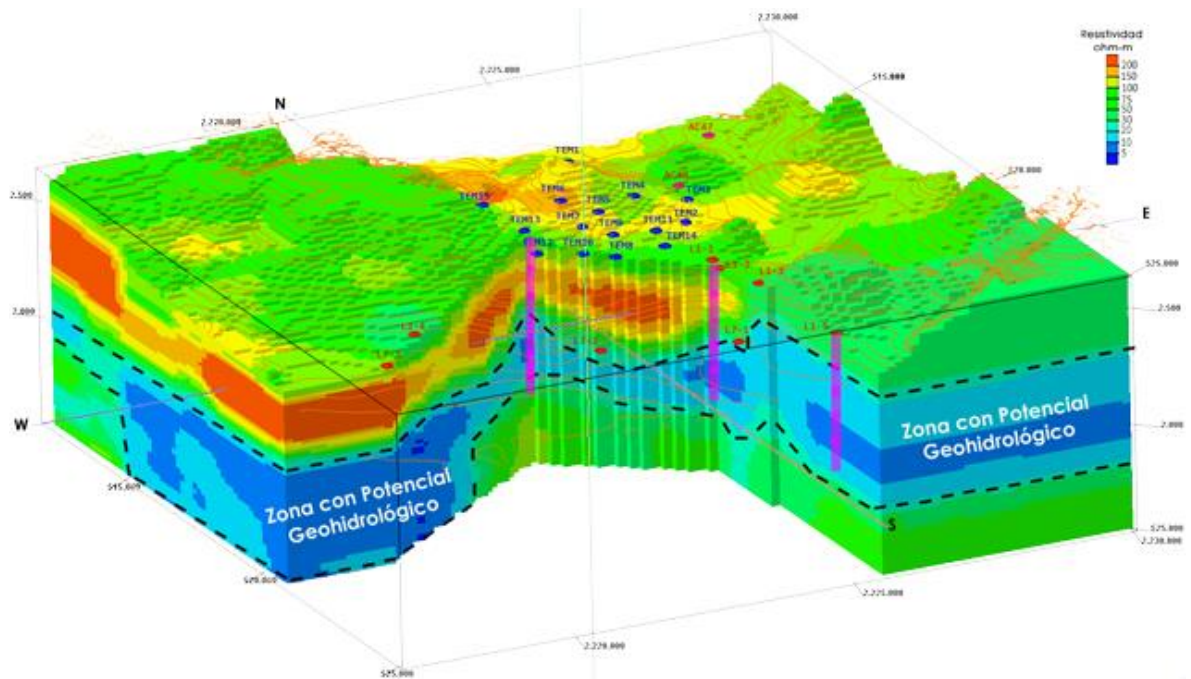
Hay varios parámetros que se deben tener en cuenta para el muestreo de un área de estudio, estos parámetros serian variables para determinar una buena recolección de datos como por ejemplo el número de barridos que se programan para la muestra, el número de pasos de frecuencia dentro de un barrido, la duración del tiempo del barrido, la frecuencia de arranque, la frecuencia de finalización, etc., estos parámetros permitirán la calidad de registros obtenidos; un ejemplo de parámetros establecidos podría ser un total de 5 barridos, cada barrido tendrá una duración de 1ms y se tendrán 70 pasos de frecuencia empezando desde 1KHz hasta 500Hz.

Una vez recolectados los datos finales de los barridos, se desea llegar a una respuesta concreta y eficaz que nos permita al fin determinar si hay existencia o no de yacimientos de petróleo, para esto se desea establecer un método que nos

⁴³ Webb SC, Constable SC, Cox CS y Deaton TK: "A Seafloor Electric Field Instrument", Journal Of Geomagnetism and Geoelectricity 37, no. 12 (1985): 1115-1129.

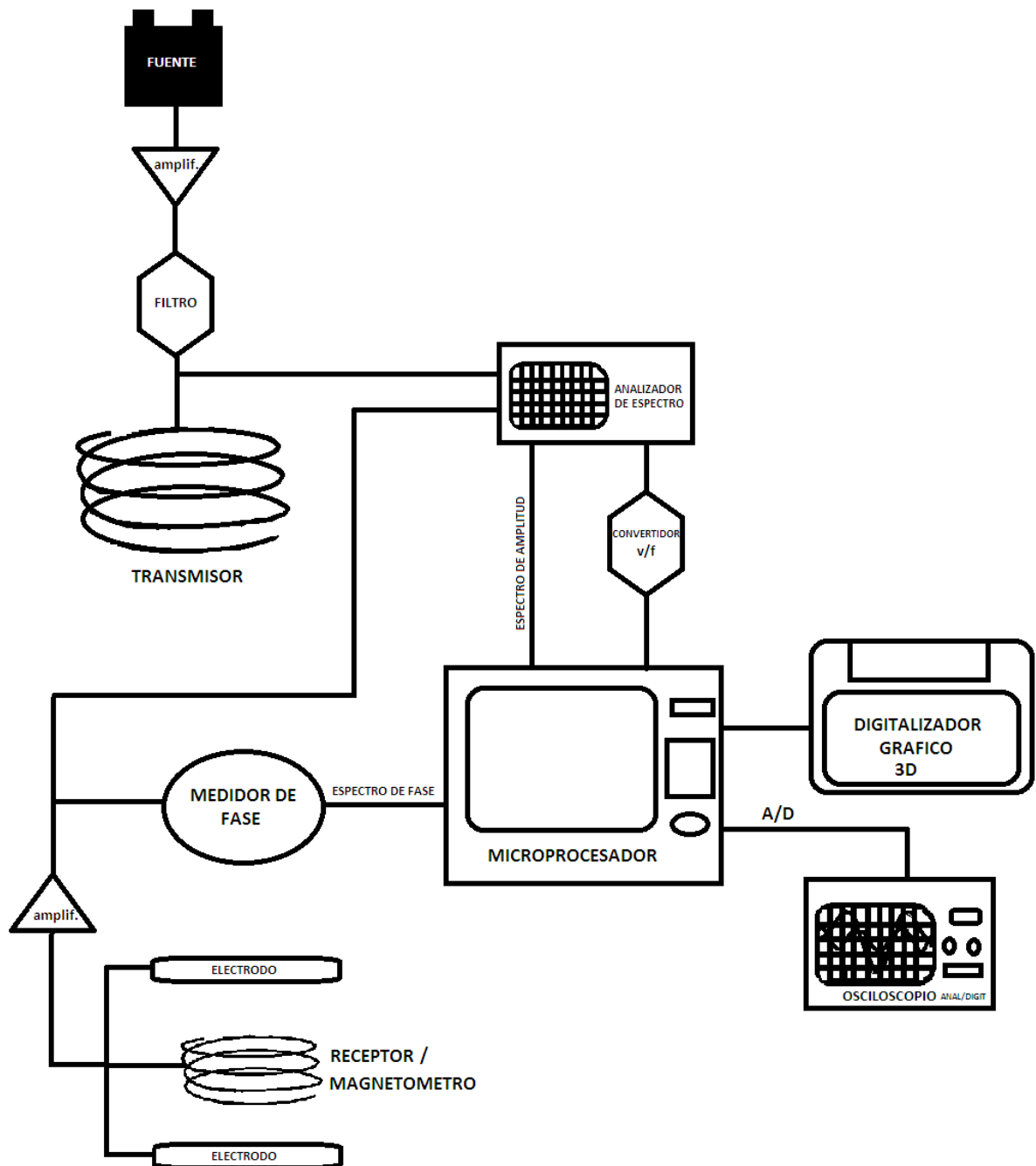
permita reflejar por un monitor una imagen clara de las concentraciones sedimentarias en el interior del suelo, estableciendo la resistividad, permitividad y permeabilidad que estas capas tengan. Una imagen 3D sería lo más beneficioso para observar, analizar y determinar las concentraciones de hidrocarburos en el subsuelo.

Figura 54. Sondeo 3D de exploración de suelos (zona roja concentración de petróleo)



Fuente: <http://www.geotem.com.mx/img/metodos/TEM.jpg>

Figura 55. Esquema de propuesta prototipo para el rastreo de trampas de petroleo usando señales electromagneticas



CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

A lo largo de la presente investigación se logró demostrar algunas características y razones necesarias para el desarrollo de un dispositivo que nos permitirá mejorar en el proceso de estudio, recolección de información y análisis de yacimientos petrolíferos.

Los métodos y procesos de desarrollo exploratorio para el interior del suelo usados en la actualidad que permiten el análisis de posibles prospectos de yacimientos petroleros presentan hoy en día grandes dificultades en la recolección de datos, valores erróneos, datos inconclusos, daños ambientales catastróficos y resultados mal interpretados han convertido el proceso de exploración de hidrocarburos en un proceso costoso para las compañías y dañino para la sociedad. La agilidad, la conservación natural, la eficiencia y la optimización son objetivos a cumplir para la contribución al buen desarrollo investigativo petrolífero, que es a lo que se desea llegar con la implementación del dispositivo.

Se observaron las diferentes características físicas y electromagnéticas de las capas del interior del suelo, a su vez el desarrollo, forma y origen de las trampas de petróleo con el fin de conocer y analizar sus componentes e integrarlas en unos modelos propuestos y de esta manera llegar a una base de estudio que nos permitiera definir las características necesarias para el desarrollo del dispositivo.

Variables, sondeos, barridos e imágenes son algunas de las tantas características que se debe enfocar el mecanismo para poder entregar resultados certeros a la hora de realizar levantamientos electromagnéticos. Estas razones fueron entonces las que nos permitieron fomentar e idealizar de alguna manera los elementos conceptuales necesarios para la implementación de un dispositivo de rastreo de trampas de petróleo usando señales electromagnéticas inducidas.

5.2 RECOMENDACIONES

Se desea en futuras investigaciones implementar un modelo en un software de variables mutifísicas como son el caso de COMSOL Multiphysics, Flow 3-D, LS-DYNA, Ansys, entre otros, en base a herramientas computacionales como Matlab, Abaqus, Ansys Workbench, etc. y construir un prototipo de transmisión y de recepción de campos electromagnéticos inducidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1].Abubakar, A.,M.Li, G. Pan, J. Liu, and T. M. Habashy, 2011, Joint MT and CSEM data inversion using a multiplicative cost function approach: Geophysics, 76, no. 3, 203-214.
- [2].ALBRECHT, H.J. (1963) Über den Einfluss von elektrischen Erdbodeneigenschaften und meteorologischen Parametern auf praktische Feldstärkeberechnungen bei Kurzwellenausbreitung. (Efecto de las propiedades eléctricas del suelo y de los parámetros meteorológicos en los cálculos de la intensidad de campo real, en el caso de la propagación de las ondas cortas). Arch. Met. Geophys. Bioklim. Ser. A. Vol. 13,429-443
- [3].ANDERSON, E. V., "Optimism returns to Mexico's petrochemical industry", en Chemical Engineering News, 7 de noviembre de 1986, p. 14.
- [4].BARBA, L. y L. Manzanilla 1987 Superficie/excavación. Un ensayo de predicción de rasgos arqueológicos en Ozttoyohualco. Antropológicas I: 19-45.
- [5].BINFORD, Lewis. Working at archaeology. University press.1978.
- [6].BUSTILLO, Revuelta, M.; López Jimeno, C. (1996). Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, impacto ambiental. Entorno Gráfico S.L. (Madrid). 372 pg.
- [7].BUTZER, Karl W. 1989.ARQUEOLOGÍA □ una ecología del hombre: Método y teoría para un enfoque contextual. Ediciones Bellaterra. Barcelona.
- [8].CANTOS F, D. 1987 Tratado de Geofísica Aplicada. Litoprint, España
- [9].CHUNGARA, Revista de Antropología Chilena; Volumen 39, No 2, 2007. Pág. 259-283.

- [10]. CAILLAMA: organización del espacio doméstico y áreas de actividad en un Asentamiento Prehispánico de altura, período intermedio tardío norte de Chile.
- [11]. Cagniard L.: "Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting," *Geophysics* 18 (1953): 605-635.
- [12]. Camara Alfaro J., Corcoran C., Davies K., Gonzales Pineda F., Hampso G., Hill D., Howard M., Kapoor J., Moldoveanu N. y Kragh E. "Reduccion del riesgo exploratorio", *Oildfield Review* 19, no.1, (2007): 26-43.
- [13]. CLARK, D.L. 1977. *Spatial Archaeology*. Londres: Academic Press.
- [14]. Colombo, D., T. Keho, and McNeice, 2012, Integrated seismic-electromagnetic workflow for sub-basalt exploration in northwest Saudi Arabia: *The Leading Edge* 31, 42-52.
- [15]. CRAIG, J.R.; Vaughan, D.J. (1981). *Ore microscopy and ore petrography*. Wiley. 406 pg.
- [16]. CRIADO, Felipe. The Visivility of Archaeological record and the interpretation of social reality. In *Interpreting Archaeology*. Ed, Michael Shanks and Ian Hodder. Routletge. London.
- [17]. CHOW, P. S., "El petróleo", en *Naturaleza. Imágenes de la ciencia*, vol. 3 núm. 2, 1972, pp. 70-76.
- [18]. Die Entwicklungsgeschichte der Erde (1980): Brockhaus Nachschlagwerk der Geologie: p.29-p.61; Brockhausverlag, Leipzig
- [19]. FANDER, H.W. (1985). *Mineralogy for metallurgists: An illustrated guide*. The Institution of Mining and Metallurgy. 77 pg.
- [20]. FLANNERY, K.1976 *The Early Mesoamerica Village*. Academic Press, New York.

- [21]. GREEK, F. B., "Global rubber industry resumes growth trend", en Chemical Engineering News, 31 de marzo de 1986, página. 17.
- [22]. HEINHOLD, R. H., "Broadening capabilities of polypropylene for appliance applications", *Proceedings Society, Plastic Engineers National Technical conference*, 17-19 de noviembre de 1975, pp. 63-67.
- [23]. HODDER, Ian. 1994. Interpretación en Arqueología. Crítica. Barcelona.
- [24]. HODDER, Ian y Orton, Clive. 1990. Análisis Espacial en Arqueología. Editorial Crítica. Barcelona.
- [25]. HOUSTON, J., "Automotive Market, Impetus to the growth of polyolefin polymers", en *Proceedings Chemical Marketing Research Association meeting*, 7-10 de febrero de 1978, pp. 142-168.
- [26]. KRIEGER James, Chemical Engineering News, 1996.
- [27]. L.F Hatch,. y Sami Matar, "From hydrocarbons to petrochemicals", en *Hydrocarbon Processing*, agosto de 1978, p. 153.
- [28]. LANUZA, J. A., Petróleo, Editorial Offset, México, 1986.
- [29]. LEPRINCE, P., Catry J. P. y Chauvel, A., *Les produits intermédiaires de la chimie de dérivés du pétrole*, Société des éditions Technip, 1967.
- [30]. Leonardon EG: "Some Observation Upon Telluric Currents and Their Applications to Electrical Prospecting," *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 33 (Marzo-Diciembre de 1928): 91-94.
- [31]. LÓPEZ Vera, F. (1991). Isótopos estables ligeros en el estudio e investigación de los yacimientos minerales. In: Lunar, R.; Oyarzun, R. (Eds.). *Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración (Parte 1)*. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces. 147-177.

- [32]. Loseth, L.O., 2007, Modelling of controlled source electromagnetic data: Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- [33]. MANGAS, J.; Sierra, J. (1991). Las inclusiones fluidas: Métodos de análisis e interpretación. In: Lunar, R.; Oyarzun, R. (Eds.). Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración (Parte 1). Ed. Centro de Estudios Ramón Areces. 79-146.
- [34]. MANZANILLA, L. 1986 Unidades habitacionales Mesoamericanas y sus áreas de actividad. En Unidades Habitacionales Mesoamericanas y sus Áreas de Actividad. IIA/UNAM, México D.F
- [35]. MANZANILLA, Linda pág. 69-70 Cobá, Quintana Roo: análisis de dos unidades habitacionales mayas.
- [36]. MEYERHOFF, A., Yacimientos gigantes de petróleo, Conacyt, México, 1983.
- [37]. MIDDLETON, W. y D. Price 1996 Identification of activity areas by multi-element characterization of sediments from modern and archaeological house floors using inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy. Journal of Archaeological Science 23:1-15.
- [38]. OPARIN, A. I., The origins of life, Mc. Millan, Nueva York, 1938.
- [39]. OVALLE M, Iván. Espacio social y áreas de actividad en asentamientos agrícolas prehispánicos tardíos en la sierra de Arica. Boletín Instituto Francés de Estudios Andinos / 2005, 34 (3): 321-355.
- [40]. PRESS, F. & SIEVER, R. (1985): EARTH.- 656pág.; W.H. Freeman and Company, New York
- [41]. PONCE, Rocío, ARGOTE, Denisse, CHÁVEZ, René M. y CÁMARA, Encarnación. Empleo de los métodos geofísicos en la prospección arqueológica urbana: la Basílica de nuestra señora de la salud, Patzcuaro, México. Trabajos de prehistoria 61, no. 2, 2004, pp. 11 a 23

- [42]. Revista Geológica de América Central, 29: 35-41, 2003
- [43]. Rymann Hansen, K. And Mittet, 2009, Incorporating seismic horizons in inversion of CSEM data, 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 694-698.
- [44]. SEMIP, Comisión Petroquímica Mexicana, Desarrollo histórico y análisis de la situación actual de la industria petroquímica en México, 1984.
- [45]. SHANKS, Michael and Ian Hodder. Processual, Postprocessual and Interpretative Archaeology. In Interpreting Archaeology. Ed, Michael Shanks and Ian Hodder. Routledge. London.
- [46]. STANLEY, S. (1994): Historische Geologie.- pág. 231-261, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin Oxford.
- [47]. STRAHLER, A. (1992): Geología Física.- pág. 19-24; Ediciones Omega S.A., Barcelona
- [48]. The Economist, August 12th 2006 (páginas 55 a 57)
- [49]. Webb SC, Constable SC, Cox CS y Deaton TK: "A Seafloor Electric Field Instrument," Journal of Geomagnetism and Geoelectricity 37, no 12, (1985): 1115-1129.

Linkografía:

<http://peroescribabien.blogspot.com/2010/05/origen-del-petroleo.html>

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec8.html>

<http://www.ecologismo.com/activismo-ecologico/proceso-de-extraccion-del-etroleo/>

http://www.articulo.org/articulo/23816/como_es_el_proceso_de_refinacion_del_petroleo.html

<http://www.senalradiocolombia.gov.co/noticia/explotacion-petrolera-vs-medio-ambiente-c-mo-lograr-el-equilibrio#sthash.u6h7JQIV.dpuf>

www.ecoportal.net/content/view/full/25268

www.arqhys.com/arquitectura/energia-alterna.html

www.eco2site.com/news/Abril-05/pan-sol.asp

www.geocites.com/venergia/solar.htm

http://www.trxconsulting.com/downloads/TRX_Metodo%20Magnetismo.pdf

https://es.scribd.com/archive/plans?doc=31326456&metadata=%7B%22context%22%3A%22archive%22%2C%22page%22%3A%22read%22%2C%22action%22%3A%22toolbar_download%22%2C%22platform%22%3A%22web%22%2C%22logged_in%22%3Atrue%7D

http://www.luisvives.com/servlet/SirveObras/24682519902240617400080/028292_0021.pdf

http://greco.fmc.cie.uva.es/mineralogia/contenido/intr_miner2_3_2.html

<https://es.scribd.com/doc/100442924/Constante-dielectrica-Ke>

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Ley-De-Archie/6390023.html#>

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Conductividad-En-Las-Rocas/3798105.html>

<http://www.ecured.cu/index.php/Geoelectricidad>

<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/587/2/122576.pdf>

[http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish12/aut12/2_rocks_h
ot.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish12/aut12/2_rocks_h
ot.pdf)

<https://es.scribd.com/doc/6886893/Cap-2-Condicion-de-frontera-para-los-campos>

[https://es.scribd.com/doc/170368952/Propiedades-Elctricas-Radiactivas-y-Acusticas-de-
Las-Rocas](https://es.scribd.com/doc/170368952/Propiedades-Elctricas-Radiactivas-y-Acusticas-de-
Las-Rocas)

[http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES_FISICAS_Y_MECANICAS_DE_LOS_SUE
LOS](http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES_FISICAS_Y_MECANICAS_DE_LOS_SUE
LOS)

[http://www.academia.edu/1313043/EXPLORACI%C3%93N_DEL_SUBSUELO_Y_CARACTERI
ZACI%C3%93N_GEOT%C3%89CNICA_DEL_TERRENO](http://www.academia.edu/1313043/EXPLORACI%C3%93N_DEL_SUBSUELO_Y_CARACTERI
ZACI%C3%93N_GEOT%C3%89CNICA_DEL_TERRENO)

<http://www.idmgeofisica.com.ar/magnetotelurica.php>

<http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/018706-Libro.pdf>

[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/146/A4.p
df?sequence=4](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/146/A4.p
df?sequence=4)

<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-ProfilerBrochure.pdf>

<http://aniak.uni.edu.pe/CAPITULO3.pdf>

<http://escholarship.org/uc/item/6x3572cc#page-2>

http://www.trxconsulting.com/downloads/TRX_Metodo%20Magnetismo.pdf